

## WEMS-1؛ مدل یکپارچه سیستم واترژنی (آب-انرژی) برای ارزیابی ترکیب بهینه فناوری در صنعت فولاد (نمونه مورد مطالعه: فولاد مبارکه اصفهان)

احمد حسین نژاد<sup>۱</sup>، یدالله سبوحی<sup>۲\*</sup>، جلال‌الدین شایگان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

hosseinnezhad@energy.sharif.edu

<sup>۲</sup> استاد دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

saboohi@sharif.edu

<sup>۳</sup> استاد دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

shayegan@sharif.edu

**چکیده:** صنعت فولاد صنعتی به شدت انرژی‌بر و همچنین به شدت آب‌بر است. در ایران، تولیدکننده‌های بزرگ فولاد در مناطق گرم و خشک قرار گرفته‌اند که اهمیت بررسی یکپارچه آب و انرژی را بیش از پیش کرده است. در این تحقیق، مفهوم واترژنی توسعه یافته ارائه و نمودار مرجع سیستم واترژنی (WERS) برای صنعت فولاد ترسیم شده است. این مفهوم برای تحلیل ارتباط بین آب و انرژی در واحدهای مختلف فولاد استفاده شده و به عنوان مدل مفهومی برای تحلیل پیوند آب و انرژی به کار گرفته شده است. در ادامه، مدل ریاضی سیستم واترژنی صنعت فولاد (WEMS-1) با استفاده از مدل ESM توسعه یافته است. ترکیب بهینه فناوری‌های سیستم بر اساس تابع بهینه‌سازی پارتو و با تابع هدف چندمعیاره کمیته هزینه کل ارزیابی شده است. برای اعتباربخشی، نتایج مدل برای وضعیت فعلی (BAU) نمونه مورد مطالعه (فولاد مبارکه اصفهان) با مقادیر طرح جامع فولاد کشور مقایسه شده است. سپس WEMS-1 با در نظر گرفتن رشد قیمت منابع آب و انرژی الکتریکی، برای ارزیابی تحول فناوری در فولاد مبارکه اجرا شده است. در سناریو بهینه با تحول فناوری و افزایش اندکی در مصرف انرژی الکتریکی، در کارخانه فولاد مبارکه اصفهان شاخص مصرف آب از  $6/78 \text{ m}^3/\text{ton steel}$  فعلی (آب متعارف) به حدود  $5/5 \text{ m}^3/\text{ton steel}$  مصرف آب نامتعارف در دوره انتهایی رسیده است.

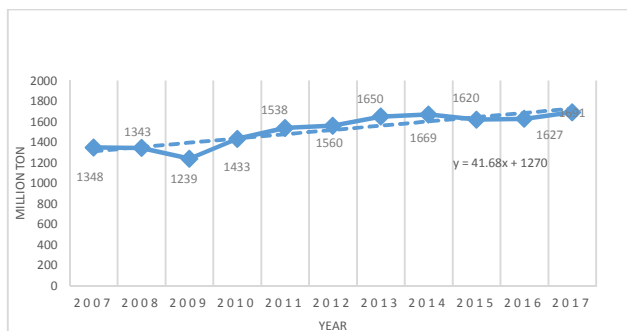
**واژه‌های کلیدی:** سیستم مرجع واترژنی، مدل‌سازی یکپارچه آب و انرژی، تخصیص بهینه منابع آب و انرژی، صنعت فولاد.

۱. مقدمه

آب و انرژی، جریان‌های حیاتی در سیستم‌های مختلف از جمله صنعت فولاد هستند. با رشد جمعیت و افزایش تقاضا برای این دو جریان، اهمیت پرداختن به ارتباط آب و انرژی برای دستیابی به توسعه پایدار بیش از پیش شده است [۱]. تعادل بین عرضه منابع آب متعارف (که شامل آب باران، آب سطحی و آب زیرزمینی می‌باشد) و تقاضای آب نیازمند فراهم بودن<sup>۱</sup> و در دسترس بودن<sup>۲</sup> آب است. تنها ۲/۵٪ از منابع آب جهان آب شیرین است و از این مقدار تنها ۰/۳٪ در دسترس برای توزیع می‌باشد [۲]. گلیک [۳] و برخی محققان دیگر در تحقیقات گسترده خود در زمینه آب، بحران‌های مختلف ناشی از کمبود آب را پیش‌بینی کرده‌اند [۳ و ۴]. صنعت فولاد با مصرف بالای آب در واحدهای مختلف گندله‌سازی، احیای مستقیم، کوره قوس و نورد، یکی از صنایع تأثیرپذیر از محدودیت منابع آب است. در سال‌های اخیر شرکت‌های فولادسازی کشور به شکل‌های مختلف با چالش کمبود آب مواجه بوده‌اند (خاموش شدن نیروگاه‌های بخار تولید برق در کارخانه ذوب آهن اصفهان یا سایر کارخانه‌های فولاد در تابستان، به‌علت نبود دسترسی کافی به آب نمونه‌ای از این چالش‌هاست).

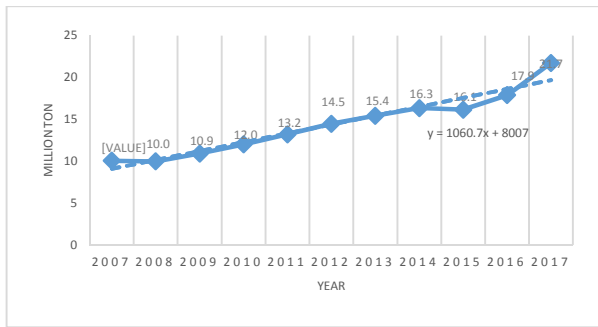
۱.۱. فولاد در جهان و ایران

در سال ۲۰۱۷ حدود ۱۶۹۱ میلیون تن فولاد خام در دنیا تولید شده است (شکل ۱) [۵].



شکل (۱): روند رشد تولید جهانی فولاد (میلیون تن در سال) [۵]

ایران در این بین با تولید حدود ۲۱/۷ میلیون تن فولاد خام در سال، حدود ۱/۱٪ تولید فولاد دنیا را به خود اختصاص داده است و طی ۱۰ سال گذشته، سالانه ۱۰٪ رشد در تولید فولاد داشته است (شکل ۲) [۵].



شکل (۲): نمودار رشد تولید سالانه فولاد در ایران [۵]

بر اساس اطلاعات و آمار ترانزنامه انرژی کشور، صنعت آهن و فولاد، از انرژی برترین صنایع کشور (البته بدون احتساب نیروگاه‌ها و پالایشگاه‌ها که از حامل‌های انرژی به‌عنوان خوراک استفاده می‌کنند) است [۶]. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی<sup>۳</sup>، صنعت آهن و فولاد به دلیل وجود مصرف انرژی فسیلی در تجهیزات احتراقی، به‌عنوان صنعتی با انتشار بالای کربن نیز به شمار می‌رود، که حدود ۶/۷٪ از تولید CO<sub>2</sub> جهان را به خود اختصاص داده است [۷]. این صنعت در ایران حدود ۶/۵ مترمکعب آب به‌ازای تولید یک تن فولاد مصرف کرده است [۸]. از این رو اکنون با اهمیت روزافزون موضوع آب، صنعت به‌شدت آب‌بر نیز معرفی شده است. همچنین بر اساس طرح جامع فولاد ایران، تولید هر تن فولاد از سنگ معدن تا مرحله نهایی تولید، حدود ۵۲۰ مترمکعب گاز و حدود ۹۸۰ کیلووات ساعت برق به روش احیای مستقیم مصرف استفاده کرده است [۸]. کشور ایران در منطقه گرم و خشک خاورمیانه قرار گرفته که با مشکل جدی محدودیت دسترسی به منابع آب مواجه است [۹-۱۱]. در مقابل، ایران دارای منابع غنی انرژی‌های مختلف از جمله منابع فسیلی و تجدیدپذیر (مانند انرژی خورشیدی در مناطق گرم همانند اصفهان) است. با گذر زمان، با کاهش یارانه سوخت، هزینه حامل‌های انرژی نیز بیشتر نمایان شده است [۲، ۱۲ و ۱۳]. کارخانه‌های تولید فولاد در دنیا اغلب در کنار آب‌های آزاد بنا نهاده شده‌اند اما در ایران دو تولیدکننده بزرگ فولاد (شرکت فولاد مبارکه با تولید سالانه حدود ۵/۵ میلیون تن فولاد و شرکت ذوب آهن اصفهان با تولید حدود ۲/۵ میلیون تن در سال [۸]) در منطقه گرم و خشک مرکزی ایران قرار گرفته‌اند [۱۴ و ۱۵]. این دو شرکت در مجموع حدود ۴۰٪ از تولید فولاد ایران را به خود اختصاص داده‌اند [۸]. در سال‌های اخیر در برخی فصول گرم سال به دلیل کمبود منابع آب در این مناطق، این کارخانه‌ها زیر ظرفیت کار می‌کنند که ضرر بسیاری برای آن‌ها به همراه دارد.

آب و انرژی در واحدهای مختلف کارخانه فولاد جریان داشته و در ارتباط تنگاتنگ هستند [۱۶ و ۱۷]. این دو جریان در واحدهای مختلف تولید فولاد از جمله کنسانتره‌سازی، گندله‌سازی، احیای مستقیم، کوره قوس و همچنین نورد یا واحدهای جانبی<sup>۱</sup> برای تولید برق و سایر سرویس‌ها در ارتباط با یکدیگر استفاده می‌شوند [۱۸-۱۶]. بر اساس برنامه راهبردی وزارت صنعت، معدن و تجارت کشور، ایران برنامه تولید ۵۵ میلیون تن فولاد را برای سال ۱۴۰۴ هدف‌گذاری کرده است [۱۹]. بر این اساس با محاسباتی کلی بر اساس داده‌های طرح جامع فولاد، برای دستیابی به این هدف، ایران نیازمند حدود ۲۹۵ میلیون مترمکعب مصرف آب و افزایش ظرفیت نیروگاهی کشور به میزان ۵۶۳۰ مگاوات و انشعاب گاز به ظرفیت ۱۸۰۰۰ میلیون مترمکعب در سال است. این در حالی است که در نیروگاه‌ها نیز به‌زای تولید هر مگاوات ساعت برق حدود ۲/۸ مترمکعب آب در سیکل خنک‌کننده تر استفاده می‌شود [۲۰].

## ۲.۱. تحلیل آب و انرژی در صنعت فولاد

با توجه به مسئله آب و انرژی در صنعت فولاد، در دنیا تحقیقات مختلفی در این حوزه صورت گرفته است. چین به‌عنوان بزرگ‌ترین تولیدکننده، حدود نیمی از فولاد دنیا را تولید می‌کند. در همین راستا در زمینه مدل‌سازی صنعت فولاد برای برنامه‌ریزی در کشور چین، تحقیقات مختلفی انجام شده است. چن [۲۱] و همکاران برای تحلیل انتشار بخش فولاد کشور چین از یک مدل دینامیک و مدل TIMES (مدل یکپارچه EFOM-Markal) استفاده کرده‌اند. این مدل که از دسته مدل‌های کلان تحلیل انرژی بخش صنعت است، برای تحلیل تقاضای فولاد، عرضه انرژی و اثر انتشارات گازهای گلخانه‌ای (انتشار CO<sub>2</sub>) این بخش از ۲۰۱۰ تا ۲۰۵۰، مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل نشان می‌دهد که تولید فولاد چین، از ۶۲۷ میلیون تن در سال ۲۰۱۰ به مقدار ۷۷۲ میلیون تن در سال ۲۰۲۰ در اوج رسیده و سپس به ۵۲۷ میلیون تن در سال ۲۰۵۰ خواهد رسید [۲۱]. در این مدل با استفاده از فناوری‌های کک‌سازی خشک و تجهیزات بازیابی حرارت گازهای خروجی<sup>۲</sup>، انتشار کربن و مصرف آب و انرژی در دوره مورد نظر مدل‌سازی کاهش یافته است. در نتایج این تحقیقات آمده است که تحول ساختار فناوری تأثیر بسیاری در کاهش مصرف منابع و کاهش انتشار خواهد داشت [۲۱]. در تحقیق کنگ و همکاران [۱۸] به استفاده از گازهای تولیدی جانبی در کنار فرایند اشاره شده است که مصرف

انرژی سیستم را در مجموع کاهش می‌دهد. در این تحقیق با روش MILP<sup>۳</sup> به تخصیص بهینه برای گازهای مازاد تولیدی پرداخته شده است [۱۸]. ونینگ چن و همکاران [۲۱] حدود ۱۶/۱٪ مصرف انرژی کشور چین در سال ۲۰۱۰ را مربوط به صنعت فولاد دانسته‌اند. حسن‌بیگی و همکاران نیز حدود ۴۶۱ TWh برق و حدود PJ ۱۴۸۷۲ انرژی چین را برای مصرف جهت تولید محصولات فولادی بیان کرده‌اند [۲۲]. در کنار این تحقیقات در سطح خرد نیز، از مدل‌سازی آب و انرژی صنعت فولاد برای ارزیابی راهکارهای کاهش مصرف آب و کاهش گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه در چین بهره برده شده است [۲۲]. وانگ همکاران [۲۲] نیز صنعت فولاد را در میان صنایع منطقه هبی<sup>۴</sup> چین، به‌عنوان صنعتی با بیشترین آب برداشتی<sup>۵</sup> با سهم ۲۸٪ و همچنین بیشترین مصرف انرژی با سهم ۵۲٪ معرفی کرده‌اند. تحقیقات وانگ و همکاران از جمله تحقیقاتی است که به‌صورت همزمان به موضوع آب و انرژی در صنعت فولاد پرداخته است. در مقاله آن‌ها، به‌طور همزمان آب و انرژی و انتشار کربن با استفاده از روش بهینه‌سازی چندمعیاره و با تابع بهینه پارتو<sup>۶</sup> مدل شده و نتایج بهینه کاهش مصرف آب و انرژی و همچنین کاهش انتشار، با به‌کارگیری فناوری‌های نوین ارائه شده است [۲۲]. در این تحقیق با استفاده از فناوری‌های نوین، کاهش مقدار SO<sub>2</sub>، NOx و انتشارات کربن را به‌ترتیب تا حدود ۹۷٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ امکان‌پذیر دانسته و نشان داده‌اند می‌توان مصرف آب و انرژی را به‌ترتیب تا ۱۰٪ و ۲٪ در این صنعت کاهش داد [۲۲]. وانگ و همکاران مطرح کرده‌اند که در مطالعات روی پیوند آب و انرژی در تحقیقات حوزه فولاد، جریان‌های آب با کیفیت‌های مختلف به‌صورت جامع در کنار انرژی مطرح نشده است [۲۳-۳۱]. مدل‌سازی آب و انرژی در سطح کلان نیز برای انتخاب ترکیب بهینه فناوری در سیستم‌های مختلف، در کارهای محققان به شکل‌های مختلف صورت گرفته است. مدل CLEW سیستم آب و انرژی را در کنار اقلیم در سطح کلان<sup>۷</sup> مدل کرده است، در این تحقیقات از مدل LEAP<sup>۸</sup> و WEAP<sup>۹</sup> استفاده شده است [۳۲ و ۳۳]. همچنین فریکو و همکاران با استفاده از مدل MESSAGE<sup>۱۰</sup> که توسط مؤسسه تحلیل کاربردی سیستم‌ها<sup>۱۱</sup> ارائه شده است، مصرف

3. Mix Integer Linear Programing

4. Hebei

5. Withdrawal Water

6. Pareto

7. Macro

8. Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP)

9. Water Evaluation And Planning

10. Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact

11. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)

1. Utility

2. Dry Coke Quenching, Exhaust Gas and Heat Recovery Equipment

استفاده کرده‌اند. در گزارش آن‌ها آمده است که بهینه‌سازی مصرف آب و به‌طور همزمان کاهش مصرف انرژی را در شبکه شهری به همراه دارد [۴۳، ۴۴، ۴۶ و ۴۷]. دمنزابت و همکاران [۴۲] نیز بهینه‌سازی همزمان آب و انرژی در ساختمان را با رویکرد واترژنی اجرا و معرفی کرده‌اند. تحقیقات آن‌ها که برای طرح جامع مدیریت انرژی فدرال<sup>۵</sup> اجرا شده است، بهینه‌سازی انرژی در اثر بهینه‌سازی آب را با رویکرد واترژنی نشان می‌دهد [۴۲]. در این تحقیقات، واترژنی برای بیان شکل‌های مختلف ارتباط آب و انرژی، مانند بهینه‌سازی مصرف انرژی در اثر بهینه‌سازی مصرف آب یا بالعکس، بازدهی مصرف آب و انرژی یا موارد دیگر مورد استفاده قرار گرفته است.

#### ۴.۱. کاستی‌های مطالعات پیشین

همان‌طور که بیان شد، در کارهای پیشین در حوزه فولاد برای برنامه‌ریزی برای بهینه‌سازی مصرف منابع آب و انرژی کارهای مختلفی صورت گرفته است [۱۷، ۱۸، ۲۱ و ۲۲]. در سطح کلان نیز مدل‌سازی‌های مختلف برای بهینه‌سازی منابع آب و انرژی ارائه شده است [۲ و ۳۵]. همچنین در سیستم‌های دیگر مانند گلخانه، ساختمان و... نیز با رویکرد جدید واترژنی، بهینه‌سازی یکپارچه آب و انرژی انجام گرفته است [۳۸، ۴۰-۴۵]. اما در این تحقیقات برخی موارد در نظر گرفته نشده است، که عبارت‌اند از:

- در بیشتر کارهای پیشین در حوزه فولاد موضوع انرژی، به‌تنهایی مدل شده است [۲۱]. مدل‌های آب و انرژی نیز به‌طور کلی تنها مقادیر مصرف آب متداول را در نظر گرفته‌اند و مدل یکپارچه آب و انرژی به‌صورت همزمان با در نظر گرفتن منابع متعارف و غیرمتعارف آب به‌صورت جامع ارائه نشده است [۲۳-۳۱].
  - در برخی تحقیقات پیشین موضوع واترژنی (پیوند آب-انرژی) تنها برای بیان بهینه‌سازی جریان‌ها در اثر کاهش مصرف منابع به کار رفته است و یا کاربرد آب و انرژی در یک فناوری مورد نظر بوده و به‌صورت سیستماتیک به موضوع مدل یکپارچه سیستم واترژنی پرداخته نشده است [۳۸، ۴۰-۴۵].
  - مدل‌های ارائه‌شده در تحقیقات قبلی همزمان با پرداختن به موضوع آب و انرژی و بهینه‌سازی این منابع، به ارزیابی سیاست‌های قیمت‌گذاری منابع آب و انرژی و تأثیر آن بر انتخاب ترکیب بهینه فناوری برای صنعت فولاد نپرداخته‌اند [۲۲ و ۴۲].
- این کاستی‌ها اهمیت وجود مدلی جامع برای تحلیل همزمان جریان‌های آب و انرژی برای بهینه‌سازی و ارزیابی تحول فناوری

آب در بخش انرژی به‌ویژه تولید برق را مدل کرده‌اند [۳۴]. این تحقیقات با رویکرد مدل‌سازی ریاضی، ترکیب بهینه فناوری در سیستم‌های انرژی را با در نظر گرفتن زیرسیستم آب ارائه کرده‌اند. در مدل TIAM نیز مدل آب در مدل سیستم‌های انرژی وارد شده و به‌صورت ریاضی مدل‌سازی و با نام TIAM-Fr ارائه شده است. TIAM-Fr برای تحلیل مصرف آب در سیستم‌های انرژی به‌ویژه بخش نیروگاهی به کارگرفته شده است [۲]. بوکارت و همکاران نیز با مدل یکپارچه آب و انرژی TIAM-Fr، شبکه برق و مصرف آب در تولید توان را بررسی کرده‌اند [۳۵]. IGSM-2 دیگر مدل آماری است که در مؤسسه فناوری ماساچوست<sup>۱</sup> برای ارزیابی تغییرات اقلیم جهان توسعه یافته است [۳۶]. این مدل برنامه‌ریزی تخصیص بهینه سرمایه‌گذاری در حوزه آب و انرژی را پیشنهاد می‌دهد. در این مدل برای تخمین اثر تغییرات اقلیم روی مدیریت مصرف منابع آب، مدل سیستم منابع آب<sup>۲</sup> توسعه داده شده است [۳۷].

#### ۳.۱. مفهوم واترژنی

یکی از عباراتی که در بیان پیوند، همبست یا همان ارتباط آب و انرژی (Water-Energy Nexus) در برخی تحقیقات به کار گرفته شده، واترژنی (WatErgy<sup>۳</sup>) است که درهم‌تندگی این دو جریان را نشان می‌دهد. رویکرد واترژنی، بیانگر یکپارچگی دو جریان آب و انرژی و همبستگی آن‌هاست. در تحقیقات مختلف از این رویکرد بیشتر برای تحلیل فناوری‌های بخشی از سیستم‌های آب یا بخشی از سیستم‌های انرژی، مانند شبکه آبرسانی شهری، بخش ساختمان و به‌ویژه فناوری‌های گرمایش و سرمایش در سیستم گلخانه‌ها استفاده شده است [۳۸-۴۱]. اسپیت جنز [۴۱] برای استفاده یکپارچه از آب و انرژی در سیستم ابداعی گروه خود در گلخانه، با عنوان گلخانه واترژنی<sup>۴</sup>، از این رویکرد برای بهینه‌سازی مصرف آب در سیستم‌های سرمایش و گرمایش و به‌طور همزمان تولید آب در گلخانه بهره برده است. گلخانه واترژنی یکی از نمونه‌های مورد مطالعه از پروژه واترژنی است که توسط اتحادیه اروپا برای بررسی و تثبیت عرضه غیرمتمرکز آب، انرژی و غذا در نمونه‌های مختلف در سه کشور هلند، آلمان و اسپانیا اجرا شده است [۳۸، ۴۰-۴۵]. در تحقیقات دیگر نیز از مفهوم واترژنی بهره برده شده است. جیمز و همکاران از مفهوم واترژنی (پیوند آب و انرژی) برای بهینه‌سازی انرژی در شبکه آب شهری

1. Massachusetts Institute of Technology (MIT university)

2. Water Resource System (WRS)

۳. واترژنی (Watergy) تلفیقی همزمان از دو کلمه آب (Water) و انرژی (Energy) است که پیوند یکپارچه آب و انرژی را بیان می‌کند.

4. Watergy Greenhouse

5. Federal Energy Management Program (FEMP)

• به منظور کاهش مصرف منابع، به‌ویژه کاهش مصرف منابع آب را در صنعت فولاد نمایان می‌سازد. برای تحلیل یکپارچه آب و انرژی و ارزیابی فناوری در کارخانه فولاد، مدل یکپارچه آب و انرژی با در نظر گرفتن هزینه سرمایه‌گذاری فناوری‌ها (در پیوست ۱، هزینه سرمایه‌گذاری واحدهای فولاد ارائه شده است) می‌تواند مسیر بهینه کاهش تخریب منابع را ارائه دهد. در تحقیق حاضر، در مدل‌سازی یکپارچه آب و انرژی از رویکرد یکپارچه و انرژی استفاده شده است. مفهوم سیستم مرجع و انرژی ابتدا تبیین و ترسیم شده و با استفاده از آن به‌طور جامع جنبه‌های مختلف ارتباط آب و انرژی و اثر آن‌ها روی یکدیگر، به‌صورت همزمان نشان داده شده و در نهایت مدل‌سازی ریاضی یکپارچه آب و انرژی فولاد ارائه شده است.

## ۲. روش شناسی پژوهش

- برای توسعه مدل جامع و یکپارچه آب و انرژی صنعت فولاد در گام اول، تهیه مدل مفهومی سیستم تولید فولاد نیاز است. در تحقیق حاضر برای تحلیل همبستگی و ارتباط دو جریان آب و انرژی در دو زیرسیستم<sup>۱</sup> آب و زیرسیستم انرژی در صنعت فولاد، مدل مفهومی سیستم مرجع و انرژی (WERS<sup>۲</sup>) فولاد ارائه شده است. تعریف و به‌کارگیری سیستم و انرژی برای مدل‌سازی یکپارچه آب و انرژی بر اساس شش اصل زیر که بین دو جریان آب و انرژی در یک سیستم لازم می‌باشد، توسعه داده شده است:
  - رابطه الزامی: اولین شرط تشکیل سیستم مرجع و انرژی وجود دو جریان آب و انرژی در بخش‌های مختلف سیستم در کنار هم است. در صنعت فولاد در واحدهای مختلف مانند واحد احیا مستقیم، واحد کوره قوس و... دو جریان آب و انرژی در کنار یکدیگر جاری می‌شوند تا واحدها تولید داشته باشند [۲۲ و ۴۸].
  - رابطه «انرژی برای آب و آب برای انرژی»: در سیستم و انرژی، جریان آب در فرایندهای تولید و تبدیل انرژی استفاده می‌شود و بالعکس انرژی در فرایندهای مربوط به آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. در واحدهای مختلف فولاد مانند نیروگاه تولید برق، آب برای تولید انرژی استفاده شده و در واحدهای تصفیه آب و یا فاضلاب، انرژی برای تأمین آب مورد نیاز استفاده می‌شود. این ارتباط آب و انرژی بیانگر رابطه «آب برای انرژی و انرژی برای آب» در سیستم و انرژی است (در مراجع [۱۳ و ۴۹] به این جنبه از ارتباط آب و انرژی پرداخته شده است).
- رابطه جایگزینی آب و انرژی: از مهم‌ترین ویژگی‌های سیستم و انرژی، امکان جایگزینی مقدار جریان‌های آب و انرژی با یکدیگر در سیستم است. این اتفاق به‌وسیله تحول فناوری اتفاق می‌افتد. این موضوع اهمیت تحول فناوری در سیستم‌ها را برای جایگزینی مقدار مصرف آب با انرژی و بالعکس می‌رساند [۲]. مصرف بیشتر برق برای بازیابی فاضلاب در سیستم جهت کاهش مصرف منابع آب تازه و به‌کارگیری منابع نامتعارف آب، نمونه‌ای از این جایگزینی است.
- بهینه‌سازی همزمان آب و انرژی در سیستم: در سیستم و انرژی بهینه‌سازی مصرف در زیر سیستم انرژی، موجب صرفه‌جویی در مصرف آب سیستم می‌شود و بالعکس [۴۲]. برای مثال بهینه‌سازی مصرف آب در اسکرابرها بعد از کوره احیا کاهش مصرف انرژی در شبکه تصفیه آب و فاضلاب را نتیجه می‌دهد و کاهش مصرف انرژی الکتریکی در اثر بهینه‌سازی در واحدهای مختلف سبب کاهش مصرف آب در نیروگاه برای تولید حامل انرژی الکتریسیته کمتر نسبت به قبل می‌شود.
- ارتباط آب و انرژی در بخش خدمات خروجی از سیستم: در سیستم و انرژی در آخرین لایه سیستم (بخش تقاضا، تولید محصول یا خدمات و... که هدف اصلی از ایجاد سیستم است) درحالی‌که محصول نهایی تولید می‌شود، این دو جریان به‌صورت خدمات آب و انرژی در کنار هم مصرف می‌شوند که خروجی مطلوب سیستم را ارائه دهند [۴۹]؛ مانند مصرف آب و انرژی در واحد نورد که ضمن مصرف انرژی برای ریخته‌گری به مصرف آب برای خنک‌سازی نیاز دارد.

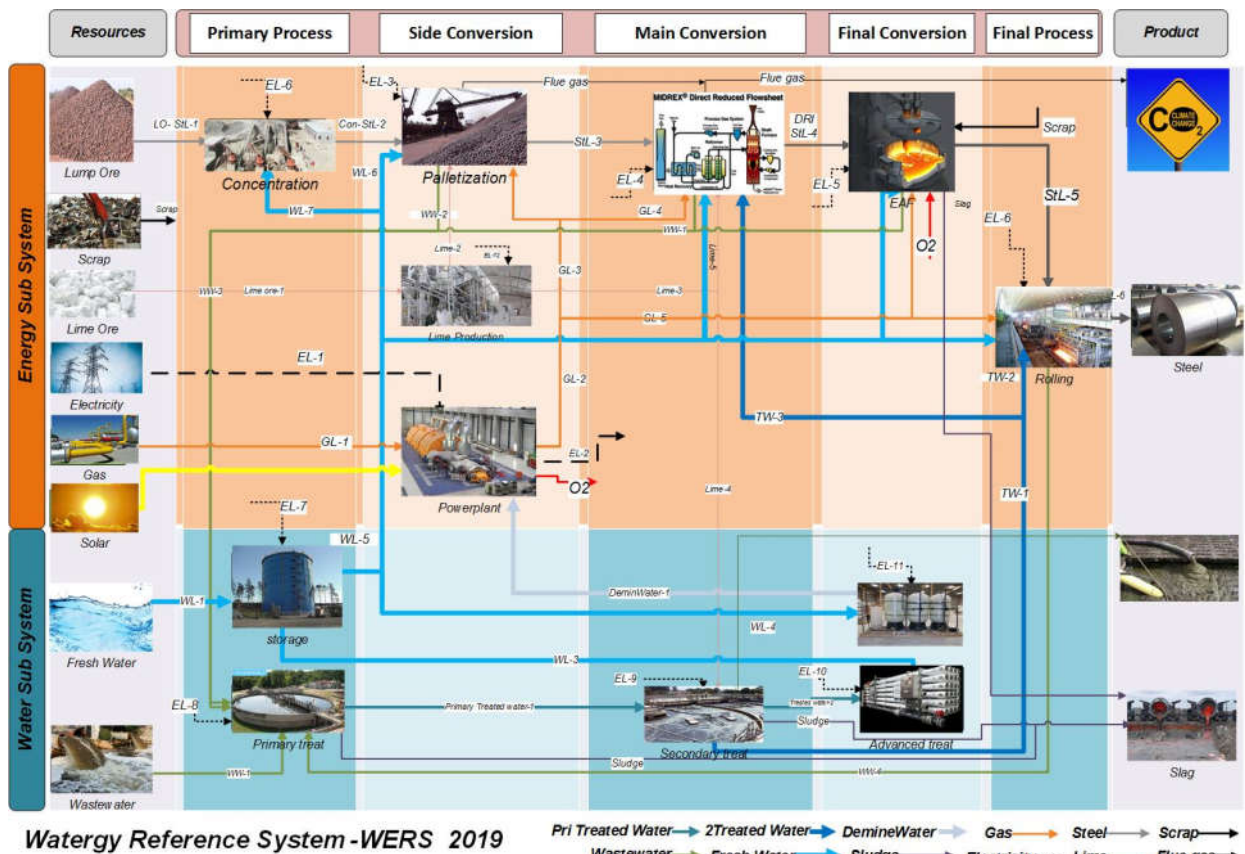
واحدهای دیگر است.

### ۱.۲. معرفی سیستم مرجع واترزی به عنوان مدل مفهومی سیستم آب و انرژی صنعت فولاد

در روش شناسی تهیه مدل جامع آب و انرژی فولاد، پیش از مدل سازی ریاضی، در ابتدا نمودار مرجع سیستم واترزی تولید فولاد به عنوان مدل مفهومی ارائه شده است. در تحقیق حاضر از مفهوم سیستم واترزی که پیش تر شرایط آن بیان شد، برای تحلیل همزمان و یکپارچه آب و انرژی در سیستم استفاده شده است. دو زیرسیستم آب و زیرسیستم انرژی شامل لایه ها و حجم کنترل های مربوط، در کنار هم در نمودار مرجع سیستم واترزی ترسیم شده است (شکل ۳).

با تبیین ارتباط آب و انرژی با رویکرد واترزی، در این شش اصل، برای مدل سازی آب و انرژی کارخانه فولاد در اولین گام، مدل مفهومی سیستم مرجع واترزی فولاد، که برای نمونه مورد مطالعه فولاد مبارکه اصفهان (بزرگ ترین تولیدکننده فولاد در ایران) ترسیم شده که در شکل (۳) ارائه گردیده است.

ایران در سال ۱۳۹۵ بر اساس مطالعات طرح جامع فولاد کشور، حدود ۱۶ میلیون تن فولاد تولید کرده که در این بین، کارخانه فولاد مبارکه اصفهان با تولید ۴/۹۷ میلیون تن، بزرگ ترین تولیدکننده فولاد در ایران است [۸]. از این رو این کارخانه به عنوان نمونه مورد مطالعه در این تحقیق انتخاب شده است. این شرکت از روش احیای مستقیم برای تولید آهن اسفنجی استفاده کرده و کوره قوس الکتریکی (EAF) را برای تولید فولاد به کار برده است. از دیگر واحدهای فولاد مبارکه، نورد و گندله سازی، واحدهای یوتیلیتی و تولید آب-بویلر و برخی



شکل (۳): نمودار مرجع سیستم واترزی فولاد مبارکه اصفهان به همراه حجم کنترل های فناوری های نوین جهت ارزیابی در سناریو بهینه (توسعه یافته توسط نویسندگان مقاله حاضر)

در این نمودار مجموع حجم کنترل های مربوط به فناوری های موجود و فناوری های نوین که امکان بازیابی یا کاهش مصرف آب و انرژی را می توانند ایجاد کنند، برای ارزیابی در سناریو بهینه ارائه شده است. همان طور که در شکل (۳) دیده می شود، جریان های آب و انرژی از منابع

مختلف با کیفیت های متفاوت تأمین می شود. این مدل مفهومی سیستم پیچیده آب و انرژی فولاد را به صورت کیفی به نمایش گذاشته است. در این نمودار، هر مستطیل بیانگر یک حجم کنترل است. کنترل نشانگر مجموع فناوری های مختلفی است که برای رقابت در مدل

مختلفی جهت تصمیم‌گیری برای ترکیب بهینه فناوری با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی (MP<sup>۴</sup>) و یا سایر روش‌ها توسعه داده شده است [۵۵ و ۵۶]. مدل‌های ریاضی مختلفی نیز برای تحلیل سیستم‌های انرژی ارائه شده است [۳۲ و ۳۵]. با افزایش اهمیت موضوع آب، محققان در برخی از مدل‌های انرژی موضوع آب را به شکل‌های مختلف اضافه کرده‌اند تا بتوانند تحلیل یکپارچه آب و انرژی را ارائه دهند [۲]. یکی از این مدل‌ها، ESM<sup>۵</sup> است [۵۸]. ESM برای مدل‌سازی سیستم‌های انرژی توسعه یافته و برای ارائه ترکیب بهینه فناوری‌های سیستم انرژی در کارهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [۵۷-۶۰]. ESM از نوع مدل‌های پایین به بالا<sup>۶</sup> برای انتخاب فناوری در تحلیل سیستم‌های انرژی است [۵۸]. مدل آب و انرژی فولاد در تحقیق حاضر با اضافه کردن زیرسیستم آب در کنار زیرسیستم انرژی برای دستیابی به سیستم یکپارچه و انرژی در یک نقطه مکانی و برای دوره زمانی چندساله با نام مدل یکپارچه WEMS-1<sup>۷</sup> در ESM توسعه داده شده است. در این مدل، از بهینه‌سازی چندمعیاره پارتو (Pareto) و روش برنامه‌ریزی ریاضی برای یافتن نقطه بهینه کاری کارخانه فولاد استفاده شده است. کارخانه فولاد به‌عنوان یک بنگاه تولیدی، به صورت رابطه (۱) مدل‌سازی شده و تابع هدف بهینه‌سازی به صورت کمینه هزینه (شامل هزینه‌های سرمایه، عملیاتی، نگهداری، منابع انرژی و آب و سایر خوراک و هزینه‌های جانبی) در این مدل انعکاس پیدا کرده است [۵۸].

$$\text{Min } Z = \sum_{t=1}^{t=T} P_{i,t} \times F_{i,t} \times \frac{1}{(1+r)^t} \times \delta_t \quad (1)$$

S.t.

$$f(F_{1,t}; F_{2,t}; \dots; F_{n,t}) \geq Q_t$$

$$\sum_{t=1}^T F_{j,t} \leq R_{j,0} + \sum_{t=1}^T D_{j,t}$$

$$F_{k,t} \leq A_{k,t} \quad k=1, \dots, n$$

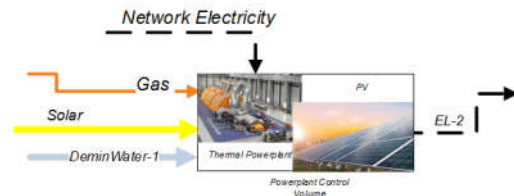
$$F_i \geq 0 \quad i=1, \dots, n$$

مدل عرضه در کارخانه فولاد (معادله ۱) کمینه مقدار ارزش فعلی هزینه‌های کل سیستم را در دوره زمانی  $T$  و با وجود قیدهای ذکر شده در ادامه معادله نشان می‌دهد. قیدهای معادله شامل تأمین تقاضای فولاد ( $Q_t$ ) مقدار فولاد مورد نظر برای تولید، محدودیت دسترسی به منابع  $R$  و سایر محدودیت‌های روی جریان‌ها در فناوری‌های مختلف (محدودیت‌های فنی، اقتصادی و دیگر جنبه‌ها) که در قیدهای معادله (۱) ذکر شده است.

در فولاد مبارکه، انواع مختلف محصولات فولادی تولید می‌شود،

ریاضی قرار می‌گیرند. برای مثال در حجم کنترل نیروگاه (شکل ۴)، فناوری‌های نیروگاه‌های حرارتی و نیروگاه خورشیدی برای رقابت در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند.

همان طور که ملاحظه می‌شود، نمودار مرجع سیستم و انرژی فولاد، نموداری جامع، دربرگیرنده همه حجم کنترل‌های فعلی و همچنین مواردی است که در مدل‌سازی برای رقابت و ارزیابی در نظر گرفته شده‌اند.



شکل (۴): جریان‌های آب و انرژی در فناوری‌های رقیب در حجم کنترل تولید برق

نحوه جاگیری حجم کنترل‌ها بین دو زیرسیستم آب و زیرسیستم انرژی در نمودار مرجع سیستم و انرژی فولاد بر اساس تغییر کیفیت جریان ورودی و خروجی آن‌هاست. نکته اصلی تغییر کیفیت حامل‌های جریان انرژی یا جریان آب در اثر گذر از حجم کنترل‌هاست. به طوری که اگر کیفیت جریان آب در اثر گذر از یک حجم کنترل تغییر کند، آن حجم کنترل<sup>۱</sup> مربوط به زیرسیستم آب است و بالعکس برای زیرسیستم انرژی نیز به همین صورت است.

دیگر ویژگی مدل مفهومی ارائه شده (WERS)، در نظر گرفتن ردپای آب<sup>۲</sup> (یا به‌نوعی چرخه عمر<sup>۳</sup> آب) در تولید محصولات فولاد در کنار ارزیابی فناوری و تخصیص بهینه منابع است که به دلیل در نظر گرفتن جریان آب از منبع تا مصرف، حاصل شده و توسط این مدل مفهومی قابل بررسی است (در برخی تحقیقات قبلی به این موضوع به‌تنهایی پرداخته شده است [۵۰]). دیگر ویژگی WERS بیان منابع غیرمتعارف آب در سیستم و انرژی است که در تحقیقات پیشین، این موضوع به صورت جامع مطرح نشده است. افزایش محدودیت دسترسی به منابع آب تازه در سال‌های اخیر، اهمیت این موضوع را برای مدل آب و انرژی فولاد بیش از پیش می‌کند به طوری که در تحقیقات انجام شده، استفاده از منابع آب نامتعارف بهترین گزینه برای کاهش کمبود آب شیرین و کاهش هزینه تولید فولاد بیان شده است [۵۱-۵۴].

## ۲.۲. مدل‌سازی ریاضی سیستم و انرژی تولید فولاد

بعد از توسعه مدل مفهومی WERS برای صنعت فولاد، برای کمی‌سازی سیستم، مدل‌سازی ریاضی ابزاری مناسب است. مدل‌های

4. Mathematical Programming  
5. Energy System Model  
6. Bottom-up  
7. WatErgy Model in Steel Industry (WEMS-1)

1. Control Volume (CV)  
2. Water Foot print  
3. Life Cycle

$$\sum_f \sum_\tau P_{fott} \times \eta_{ott} - \sum_\theta A_{o\theta et} = 0 \quad (4)$$

در معادله (4)،  $P$  مقدار جریان انرژی/آب ورودی از منبع  $f$  به فناوری  $\tau$  برای تولید جریان انرژی/آب  $o$  در زمان  $t$  و  $\eta_{ott}$  بازده فناوری  $\tau$  است.  $A$  بیانگر جریان ورودی انرژی/آب  $o$  به فناوری  $\theta$  برای تولید  $e$  در زمان  $t$  است. این معادله تراز جریان‌های آب و انرژی ورودی و خروجی را برای تأمین تقاضای مورد نیاز جهت تولید محصول واحد ایجاد کرده و پیوند جریان‌های آب و انرژی را در یک فناوری از سیستم نشان می‌دهد.

#### 4.2.2. معادلات بازیابی سالانه (Recycling)

به دلیل محدودیت منابع آب در مناطق خشک مانند اصفهان (که شرکت فولاد مبارکه در این مناطق قرار گرفته است)، یکی از مؤثرترین راهکارهای مقابله با چالش آب، بازیابی فاضلاب خروجی از واحدهاست. کنراند [61] در تحقیق خود با عنوان «تئوری تولید با بازیابی» به‌طور تفصیلی به موضوع استفاده مجدد پرداخته است. هر واحد دارای فاضلاب خروجی است. در مدل WEMS-1 معادلات (5) و (6) به‌صورت کلی، روابط بازیابی و اثر آن در کاهش مصرف آب ورودی را در یک دوره نشان می‌دهد. یکی از معادلات به‌کار گرفته‌شده در WEMS-1 نسبت به مدل‌های قبلی ([58]) استفاده از معادلات (5) و (6) برای انعکاس بازیابی سالانه فاضلاب تولیدی در سیستم است.

$$W_{rlntt} = \beta_{rlntt} \times M_{lntt} \quad (5)$$

$$F_{nlntt} = (1 - \beta_{rlntt}) M_{lntt} \quad (6)$$

در معادله (5)،  $W$  سهم فاضلاب  $r$  تولیدشده در فناوری  $\tau$  در فرایند تبدیل جریان  $l$  به جریان  $n$  در زمان  $t$  را بیان می‌کند. مقدار جریانی است که به‌جای ریختن به محیط‌زیست به‌عنوان فاضلاب می‌تواند بازیابی و دوباره استفاده شود.

بازیابی و بازچرخه جریان‌ها تحت تأثیر زمان و به‌صورت دینامیک است، ولی در اینجا معادله (5) و (6) به‌صورت کلی مجموع سهم جریان بازیابی‌شده در یک دوره را ارائه می‌دهد و مقدار مجموع جریان بازیابی‌شده در یک سال در نظر گرفته شده است. این مقدار بازیابی‌شده در سیستم، جایگزین مقدار برداشت از منابع اولیه آب و کاهش تخریب آن می‌شود. در WEMS-1 این رابطه در کنار سایر روابط بازیابی بهینه و امکان انتخاب فناوری‌های بازیابی و تصفیه فاضلاب را ارائه می‌دهد.

ولی به همراه آن برخی جریان‌های جانبی یا آلاینده نیز تولید می‌شود. جزئیات روابط و محدودیت‌های حاکم بر مدل WEMS-1 در ادامه ارائه شده است.

#### 1.2.2. معادلات محصولات و لایه خروجی سیستم

تولید محصولات فولادی مانند ورق‌های فولادی، محصول اصلی فولاد مبارکه و خروجی لایه محصول در مدل WEMS-1 است. معادله (2) بیانگر این قید مربوط به برآورده شدن تقاضای مورد نظر فولاد یا همان محصولات فولاد مبارکه و یا آب و انرژی نهایی خروجی از سیستم است [58].

$$\sum_{K=1}^m \sum_{\tau=1}^n F_{K\tau jt} \times \eta_{K\tau jt} \geq U_{jt} \times \alpha_j \quad (2)$$

دو جریان اصلی آب و انرژی، در فناوری مورد نظر با ضرایب بازده خود در کنار دیگر ورودی‌ها، محصول مورد نظر را تولید می‌کند. در معادله (2)،  $F$  بیانگر مقدار مصرف جریان ورودی آب/انرژی  $K$  به فناوری  $\tau$  برای تولید محصول  $j$  در زمان  $t$  است.  $\alpha$  سهم محصول  $j$  را در بین تولیدات واحد نشان می‌دهد.

#### 2.2.2. قید ظرفیت فناوری‌ها

اگر ظرفیت فناوری مشخص باشد، مقادیر مواد و انرژی یا آب مصرفی برای تولید محصول خروجی فناوری تعیین می‌شود. برای در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت فناوری‌ها در مدل از رابطه (3) استفاده شده است [58].

$$F_{K\tau jt} \times \eta_{K\tau jt} - \sum_{w=(t-PL)}^t Y_{K\tau jw} \times PF_{K\tau jt} \leq \sum_{\theta=(b-(PL-t))}^t H_{K\tau j\theta} \times PF_{K\tau jt} \quad (3)$$

در معادله (3)،  $Y$  نشان‌دهنده ظرفیت فناوری  $\tau$  برای تبدیل جریان انرژی/آب  $K$ ، به جریان انرژی/آب  $j$ ، در زمان  $t$  است.  $H_{K\tau j\theta}$  ظرفیت تاریخی فناوری  $\tau$  و  $PF_{K\tau jt}$  ضریب ظرفیت فناوری  $\tau$  برای تبدیل جریان انرژی/آب  $K$ ، به جریان انرژی/آب  $j$ ، در زمان  $t$  است.

#### 3.2.2. معادلات فرآورش و تبدیل

فناوری‌های مختلف (که بخش‌های فرایند و تبدیل در کارخانه فولاد را شکل می‌دهند) در هر حجم کنترل، جریان‌های آب و انرژی و یا سایر نهاده‌ها را دریافت کرده و محصول مورد نظر را تولید می‌کنند. قانون اول ترمودینامیک به‌صورت معادله (4) روابط بین جریان‌های ورودی و خروجی برای انرژی و همین‌طور برای آب را نشان می‌دهد [22] و [58]. این رابطه برای همه حجم کنترل‌ها صادق است.



## ۵.۲.۲. معادلات برداشت از منابع (آب و انرژی)

جریان انرژی در فناوری‌های تبدیل و فراورش از انواع مختلف منابع انرژی می‌تواند سرچشمه بگیرد. معادله (۷) در مدل WEMS-1 برداشت از منابع انرژی را نشان می‌دهد [۵۸].

$$E_{fot} - \sum_{\theta} P_{f\theta ot} = 0 \quad (۷)$$

در معادله (۷)،  $E$  مقدار جریان  $o$  برداشت شده از منبع انرژی  $f$  در زمان  $t$  را نشان می‌دهد.  $P$  نیز مقدار انرژی ورودی  $o$  به فناوری  $\theta$  از منبع انرژی  $f$  را ارائه می‌دهد.

در مدل توسعه داده شده در کنار منابع انرژی، منابع آب نیز وارد شده است. منابع آب غیرمتداول هم به صورت جریان‌های مختلف در کنار منابع متداول آب در نظر گرفته شده‌اند. در معادله (۸)، معادله برداشت از منابع مختلف آب نیز با روند مشابه با منابع انرژی ارائه شده است.

$$W_{vgt} - \sum_{\tau} S_{v\tau gt} = 0 \quad (۸)$$

در معادله (۸)،  $W$  بیانگر مقدار جریان آب  $g$  است که از منبع آب  $v$  در سیستم کارخانه فولاد جاری می‌شود.  $S$  هم جریان آب خروجی  $g$  از منبع  $v$  است که به فناوری  $\tau$  در زمان  $t$  وارد می‌شود.

با این معادله، منابع آب نیز در مدل WEMS-1 در کنار منابع انرژی منعکس می‌شود و مدل یکپارچه برای تحلیل همزمان آب و انرژی حاصل می‌گردد. این معادله در مدل قبلی سیستم انرژی استفاده نشده و با توجه به انعکاس زیرسیستم آب در تحقیق حاضر ارائه و در WEMS-1 مورد استفاده قرار گرفته است.

۶.۲.۲. آلاینده‌گی و انتشار CO<sub>2</sub>

در اثر به‌کارگیری فناوری‌های مختلف از جمله فناوری‌های احتراقی برای تولید گرمایش گازهای احتراق تولید می‌شود. از جمله گازهای حاصل از احتراق، گاز CO<sub>2</sub> است. سایر فرایندها نیز ممکن است محصولات جانبی ناخواسته یا آلاینده‌های جانبی را داشته باشند. علاوه بر این در واحدهای فولاد، سرباره و ضایعات تصفیه فاضلاب‌ها از جمله آلاینده‌های جانبی دیگر هستند. رابطه (۹) انتشار آلاینده‌های جانبی را نشان می‌دهد [۵۸].

$$P_{ijt} = p_{ijt} \times X_{jt} \quad (۹)$$

در معادله (۹)،  $P$  بیانگر انتشار آلاینده  $i$  در فناوری  $j$  در زمان  $t$  است.  $p_{ijt}$  نیز ضریب نشر آلاینده است و  $X$  سطح فعالیت فناوری  $j$  است.

## ۷.۲.۲. مدل‌سازی جریان فاضلاب تولیدی فرایند

در اثر به‌کارگیری جریان آب در فناوری‌های مختلف، فاضلاب تولید

می‌شود. در مدل WEMS-1 با توجه به اینکه محدودیت منابع آب امکان رقابت فاضلاب به‌عنوان یک منبع نامتعارف آب را ایجاد می‌کند، در نتیجه جریان فاضلاب تولیدی هر واحد در مدل به صورت جریانی مجزا وارد شده است. در نتیجه فاضلاب یا برای استفاده مجدد به سیستم‌های تصفیه منتقل می‌شود و یا به‌عنوان آلاینده از سیستم خارج می‌شود. رابطه (۱۰) معادله جریان‌های خروجی فاضلاب از فناوری‌ها را نشان می‌دهد که از معادلات اضافه‌شده به مدل‌های پیشین [۵۸] در تحقیق حاضر است.

$$WW_{ijt} = ww_{ijt} \times Y_{jt} \quad (۱۰)$$

در معادله (۱۰)،  $WW$  مقدار فاضلاب تولیدی  $i$  از فناوری  $j$  در زمان  $t$ ، و  $ww$  ضریب انتشار آلاینده  $i$  و  $Y$  سطح فعالیت فناوری  $j$  است.

## ۸.۲.۲. تابع هدف: تابع کمینه هزینه

هزینه‌ها نشان‌دهنده مقدار تخصیص عوامل و منابع مختلف در سیستم تولید فولاد است. معیاری که نقطه بهینه برای ترکیب فناوری کارخانه فولاد را نشان می‌دهد، کمترین استفاده از منابع و هزینه‌هاست. این معیار همان دوگان سود و بازده اقتصادی است. WEMS-1 برای رسیدن به تعادل بین عرضه منابع و محصولات تولیدی اجرا می‌شود. تابع هدف مدل WEMS-1، کمینه هزینه تولید فولاد ( $Z$  در معادله ۱۱) در نظر گرفته شده است. تابع هزینه شامل مجموع مقادیر ارزش فعلی هزینه‌های سرمایه‌گذاری واحدها ( $\bar{K}$ )، مجموع هزینه نگهداری و تعمیرات ( $\bar{M}$ )، هزینه‌های عملیاتی ( $\bar{C}$ )، هزینه‌های خوراک و منابع ورودی به کارخانه فولاد ( $\bar{R}$ )، و هزینه‌های خارجی ( $\bar{E}$ )، کل سیستم فولاد است. هر عبارت تابع هزینه با توجه به معادلات مشخصه خود در معادلات محاسبه شده و به صورت کلی در معادله (۱۱) در مدل در نظر گرفته می‌شود:

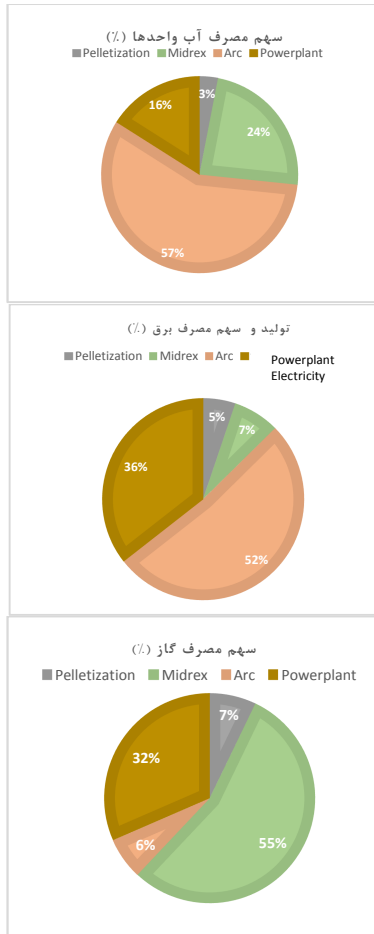
$$Z = \bar{K} + \bar{M} + \bar{C} + \bar{R} + \bar{E} \quad (۱۱)$$

با مواجه شدن با محدودیت منابع آب برای انعکاس ارزش آب در تصمیم‌گیری ترم مربوط به خوراک و برداشت منابع به بخش‌های اصلی انرژی و آب و سایر نهاده‌های ورودی تقسیم شده است. رابطه (۱۲) که در تحقیق حاضر به مدل سیستم انرژی اضافه شده است، سبب انعکاس زیرسیستم آب و در نظر گرفتن رقابت منابع متعارف و غیرمتعارف آب جهت استفاده در سیستم می‌شود. بخش مربوط به ورودی‌ها یا منابع ( $\bar{R}$ ) در نهایت به صورت معادله (۱۲) در تابع هدف در نظر گرفته شده است.

$$\bar{R} = \bar{w} + \bar{e} + \bar{f} \quad (۱۲)$$

به این طریق، هزینه برداشت از منابع مختلف آب  $\bar{w}$ ، در کنار خوراک ورودی  $\bar{f}$  و انرژی  $\bar{e}$  در مدل منعکس می‌گردد. این موضوع از ویژگی‌های مدل WEMS-1 است که زیرسیستم آب را در کنار زیر سیستم انرژی منعکس می‌کند.

هرچند فولاد مبارکه واحد کنسانتره سازی ندارد ولی برای اینکه چرخه کامل تولید فولاد دیده شود، این واحد نیز در مدل در نظر گرفته شده است. همان طور که ملاحظه می شود، از اولین تا آخرین مرحله فرایند تولید فولاد<sup>۱</sup> به روش احیای مستقیم حدود ۶/۷۸ مترمکعب آب به ازای تولید هر تن فولاد، مصرف شده است.



شکل (۶): مصرف منابع آب و انرژی در واحدهای مختلف فولاد مبارکه اصفهان (%). - تصاویر از بالا: مصرف منابع آب، تولید و مصرف برق و سهم مصرف گاز (مقادیر خروجی از اجرای مدل WEMS-1 برای سناریو BAU) همچنین سهم واحدهای مختلف در مصرف منابع آب و انرژی برای وضعیت فعلی<sup>۲</sup> در نمودارهای شکل (۶) ارائه شده است.

#### ۴.۲. نتایج اجرای سناریو بهینه مدل WEMS-1

راهکارهای کاهش مصرف آب و انرژی در صنعت فولاد به طرق مختلف امکان پذیر است. اولین راه کاهش مصرف واحدها و رسیدن به مقدار ارائه شده توسط استاندارد برای فناوری های فعلی است. این روش تا حدودی هرچند اندک در کاهش مصرف منابع سهم دارد. راه دیگر جایگزینی منابع است، برای مثال با جایگزینی آب نامتعارف

هرچند که مدل های انرژی پیشین روابط آب را نداشته و در WEMS-1 موضوع آب اضافه شده است (مانند روابط ۵، ۶، ۱۰ و ۱۲) ولی در مدل های آب و انرژی مشابه برخی از روابط مربوط به بخش آب به کار گرفته شده است [۲۲]. وجه تمایز اصلی WEMS-1 نسبت به تحقیقات قبلی، رویکرد سیستماتیک و در نظر گرفتن آب و انرژی در سیستم در کنار بازیابی جریان آب و انتخاب فناوری در کنار انتخاب جریان بهینه منابع به صورت یکپارچه است که در هریک از تحقیقات قبلی به برخی از این موارد جداگانه پرداخته شده است. رویکرد مورد استفاده در مقاله حاضر، روشی جدید برای تحلیل یکپارچه آب و انرژی سیستم فولاد را ارائه کرده است.

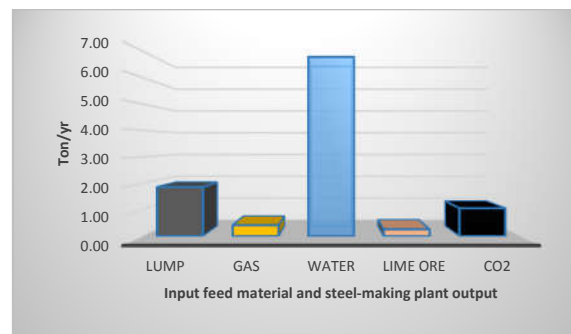
#### ۳.۲. اعتباربخشی مدل WEMS-1

برای اعتباربخشی، مدل برای وضعیت فعلی فولاد مبارکه اجرا شده است. نتایج حاصل از مدل برای تولید سالانه ۴,۹۷۰,۰۰۰ تن فولاد با داده های طرح جامع، در جدول (۱) مقایسه و صحت سنجی شده است. نزدیکی مقادیر برداشت از منابع برای مصارف مختلف واحدها، بر اساس نتایج مدل WEMS-1 با مقادیر ارائه شده در طرح جامع فولاد [۸] و درصد خطای اندک، صحت عملکرد مدل را می رساند.

جدول (۱): مقایسه نتایج مدل WEMS-1 و مقادیر مصرف منابع بر اساس طرح جامع فولاد ایران ۹۵ (مرجع [۸])

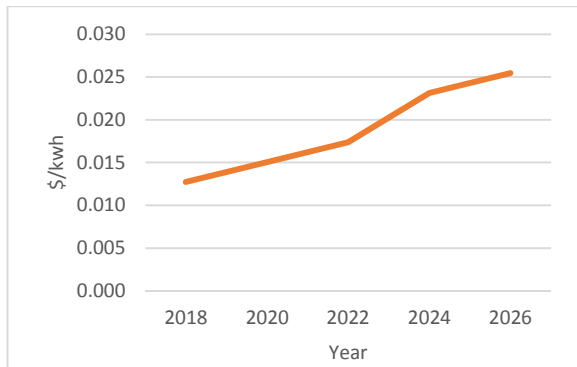
مصرف سالانه منابع	مقادیر طرح جامع فولاد	نتایج مدل WEMS-1 برای وضعیت فعلی	درصد خطای نسبی
✓ آب (میلیون مترمکعب)	۳۴/۱	۳۳/۷	۱/۱۷٪
✓ گاز (میلیون مترمکعب)	۲۴۵۴	۲۷۴۰	۱۱/۶۵٪
✓ برق (GWh)	۵۵۱۸	۵۷۷۰	۴/۵٪
✓ سنگ آهن (میلیون تن)	۹/۲۴	۹/۲۴	۰

شاخص های وضعیت فعلی بر اساس نتایج مدل نیز به صورت شکل (۵) ارائه شده است.



شکل (۵): شاخص های مصرف منابع برای تولید یک تن فولاد در شرکت فولاد مبارکه، بر اساس مدل WEMS-1 در سناریو BAU

1. Well to wheel
2. Business As Usual (BAU)



شکل (۸): رشد قیمت برق در دوره‌های مختلف در مدل WEMS-1

قیمت انرژی الکتریکی در دوره‌های نهایی به بیش از دو برابر قیمت یارانه‌ای فعلی رسیده است. به دلیل وجود منابع غنی گاز در ایران، قیمت آن ارزان‌تر از قیمت جهانی برای صنعت ارائه می‌شود. در مدل نیز برای گاز افزایش قیمت در نظر گرفته نشده است. قیمت آب طی دوره‌های میانی به قیمت آب تولیدی آب شیرین‌کن‌ها رسیده و در انتها، بیش از این مقدار در نظر گرفته شده است. این قیمت‌گذاری برای آب، اثر محدودیت منابع آب به‌ویژه در استان اصفهان را انعکاس می‌دهد. در نهایت مقدار تولید فولاد در سناریو بهینه برابر با ۴,۹۷۰,۰۰۰ تن در سال قرار داده شده و مدل اجرا شده است.

### ۳. تحلیل نتایج مدل WEMS-1

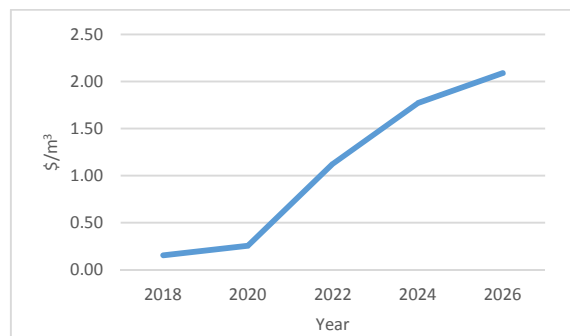
با قرار دادن فناوری‌های رقیب (جدول ۲) و همچنین منابع مختلف آب (متداول و غیرمتداول) و منابع انرژی (فسیلی و تجدیدپذیر) در مدل WEMS-1 به صورت همزمان و رشد قیمت حامل‌های آب و انرژی، مدل طی دوره‌های زمانی اجرا شده است (هزینه سرمایه‌گذاری بر اساس پیوست ۱ در نظر گرفته شده و هزینه عملیاتی و نگهداری برحسب درصدی محدود از هزینه سرمایه‌گذاری منعکس شده است). شکل (۹) ترکیب بهینه فناوری را بر اساس مدل WEMS-1 نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، فناوری‌های برج خنک‌کن هیبریدی و فناوری نوین سیستم خنک‌کن به روش سیکلون خشک (جایگزین اسکراب‌های واحد احیای مستقیم) از اولین دوره انتخاب شده‌اند. صنایع انرژی‌بر در ایران موظف به تولید سهمی از برق مصرفی داخل کارخانه هستند. به همین دلیل در سال‌های اولیه نیروگاه بخار (با ظرفیت حدود ۲۰۰ مگاوات) و نیروگاه گازی (با ظرفیت حدود ۱۰۰ مگاوات) در کنار برق شبکه در فولاد مبارکه وجود دارد. پس از اجرای مدل بهینه، با توجه به تولید بخشی از برق مصرفی فولاد مبارکه در وضعیت فعلی توسط نیروگاه‌های بخار و نیروگاه گازی (که از قبل احداث شده‌اند)، در سناریو پایه در کنار برق شبکه این دو نوع نیروگاه با ظرفیت‌های مشخص خود توسط مدل انتخاب شده و

یعنی فاضلاب با منابع آب، در نتیجه به‌کارگیری فناوری‌های تصفیه فاضلاب، از تخریب منابع آب جلوگیری می‌شود. این روش در دو حالت ممکن است: یا فاضلاب تولیدی واحدها بازیابی می‌شود یا فاضلاب به‌عنوان جریان ورودی به جای آب تازه وارد کارخانه شده و پس از تصفیه مورد استفاده قرار می‌گیرد. سومین راهکار کاهش مصرف منابع، به‌کارگیری فناوری‌های نوین با مصرف کمتر آب است. برخی فناوری‌های نوین تبدیل انرژی مانند پنل‌های فتوولتائیک<sup>۱</sup> نیز با جایگزینی روش تولید برق با روش برج‌های خنک‌کننده، باعث کاهش مصرف آب می‌شوند. هرکدام از این موارد تأثیر مختلفی بر کارخانه تولید فولاد و ترکیب مصرف منابع آب و انرژی دارد. روش‌ها و فناوری‌های مطرح‌شده فوق و برخی موارد ممکن دیگر، در مدل WEMS-1، برای ارزیابی و ارائه راهکارهای بهینه وارد شده است (جدول ۲). همچنین هزینه سرمایه‌گذاری مربوط به هر یک از فناوری‌ها در پیوست (۱) در پایان مقاله ارائه شده است.

جدول (۲): فناوری‌های رقیب در واحد تولید فولاد مبارکه اصفهان

حجم کنترل	فناوری موجود	فناوری‌های جدید رقیب
واحد احیای مستقیم	اسکراب‌های تر	سیکلون‌های خشک
تصفیه پیشرفته	-	تصفیه غشایی
تولید آب از هوا	-	تولید آب از هوا به روش تراکمی
واحد نیروگاه	نیروگاه گازی+	پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک
	نیروگاه بخار یا سیکل خنک‌کن تر	نیروگاه بخار با برج‌های خنک‌کن هیبرید

قیمت حامل‌های انرژی الکتریکی و آب در بازه‌های زمانی مختلف برنامه در مدل بهینه به صورت افزایشی تغییر پیدا کرده است (شکل ۷ و ۸).



شکل (۷): رشد قیمت آب در دوره‌های مختلف در مدل WEMS-1

1. Photovoltaic (PV)

فناوری تولید برق خورشیدی با استفاده از پنل‌های فتوولتائیک انتخاب نشده است.

	سال پایه	۲۰۲۰	۲۰۲۲	۲۰۲۴	۲۰۲۶	۲۰۲۸
تولید برق						
تولید فولاد						
تولید آب						
تولید انرژی						

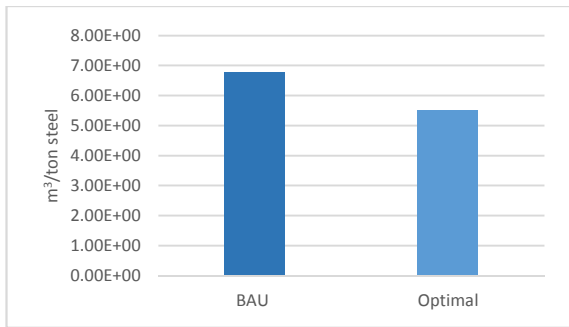
شکل (۹): ترکیب بهینه فناوری‌های فولاد مبارکه در قیمت‌های مختلف حامل‌های آب و انرژی در دوره‌های مختلف

نظر گرفتن قیمت واقعی برای هر مترمکعب آب، مدل انتخاب منابع فاضلاب را به جای آب پیشنهاد می‌دهد (جالب توجه است که در فولاد مبارکه خرید فاضلاب به وقوع پیوسته و در حال حاضر نیز از برنامه‌های در حال اجراست). در نتیجه، سیستم‌های تصفیه فاضلاب نیز با ظرفیت بیشتر، از دوره سوم (۲۰۲۲) انتخاب شده‌اند. در دوره میانی، همچنان واحدهایی که کیفیت بالاتر آب را نیاز دارند (مانند واحد گندله‌سازی) از آب تازه ورودی به کارخانه مصرف می‌کنند. ولی با رشد قیمت آب تازه به بیش از قیمت آب تولیدی توسط آب شیرین‌کن‌ها در دوره آخر، مدل تصفیه پیشرفته غشایی را برای تأمین آب با کیفیت بالاتر (به‌منظور ارتقای کیفیت پساب خروجی از تصفیه ثانویه) انتخاب کرده است که در نتیجه سیستم‌های تصفیه پیشرفته غشایی، آب واحد گندله‌سازی را تأمین می‌کند. سیستم تولید آب از هوا به روش تراکمی به دلیل مصرف بالای برق و هزینه سرمایه بالای کمپرسورها در بیشترین قیمت آب نیز انتخاب نشده است. در نتیجه اگر شرکت فولاد مبارکه به دنبال تولید آب از بخارات واحدهایی حاصل از خنک‌سازی سرباره‌ها و یا نورد است، نیاز است به روش‌های ترمودینامیکی جایگزین کمپرسورهای تراکمی (که از

با رشد قیمت برق شبکه و با توجه به تابش مناسب خورشید در منطقه اصفهان برای تولید برق، در دوره نهایی مدل‌سازی، تا ۱۶٪ تقاضای انرژی الکتریکی از طریق سیستم پنل‌های فتوولتائیک تأمین شده است.

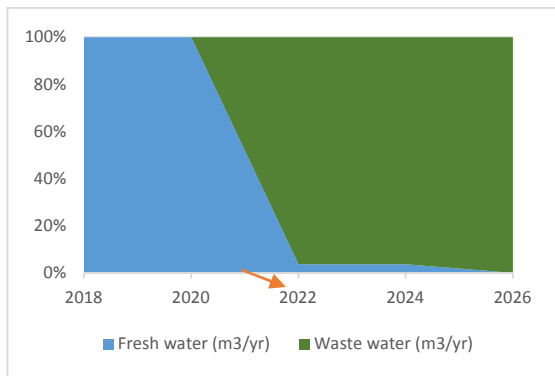
با توجه به محدودیت منابع آب و رشد قیمت آن، مدل از همان ابتدا نیروگاه بخار با سیکل خنک‌کننده هیبریدی را به‌عنوان جایگزین نیروگاه با سیکل تر انتخاب می‌کند. جایگزینی برج هیبرید و توسعه سیستم پنل‌های فتوولتائیک هرچند سرمایه بیشتر نیاز دارد ولی کاهش مصرف آب را به همراه دارد که در مجموع این فناوری‌ها را در زمان مختص خود اقتصادی کرده است.

تصفیه فاضلاب داخلی (فاضلاب خروجی از واحدهای فرایند تولید فولاد) کارخانه از سال ابتدایی اقتصادی شده است. با رشد بیشتر قیمت آب، از دوره سوم (۲۰۲۲) خرید فاضلاب شهری برای کارخانه فولاد پیشنهاد شده است. هرچند که قیمت سیاست‌گذاری دولت برای آب صنایع ثابت است، ولی محدودیت منابع آب در اصفهان در فصل تابستان ارزش بیشتر آب نسبت به قیمت دولتی را نشان می‌دهد. در نتیجه با در

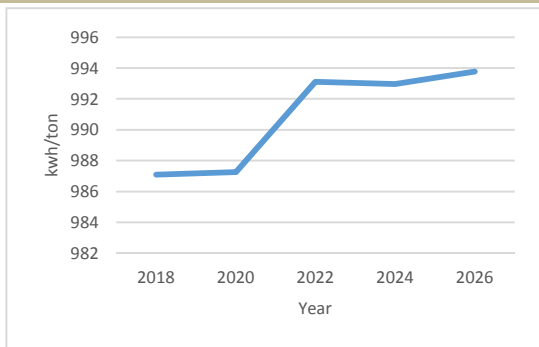


شکل (۱۱): شاخص مصرف آب (متعارف و غیرمتعارف) در وضعیت فعلی و سناریو بهینه (مقدار مصرف آب به مترمکعب به ازای هر تن فولاد تولیدی است)

با رشد قیمت آب، منابع نامتعارف فاضلاب، جایگزین مصرف آب شده‌اند. نمودار سهم جایگزینی مصرف فاضلاب با آب در دوره‌های زمانی در فولاد مبارکه در شکل (۱۲) آمده است.



شکل (۱۲): سهم جایگزینی منابع فاضلاب با آب تازه با اجرای سناریو بهینه به عنوان منبع ورودی به کارخانه فولاد در مدل WEMS-1

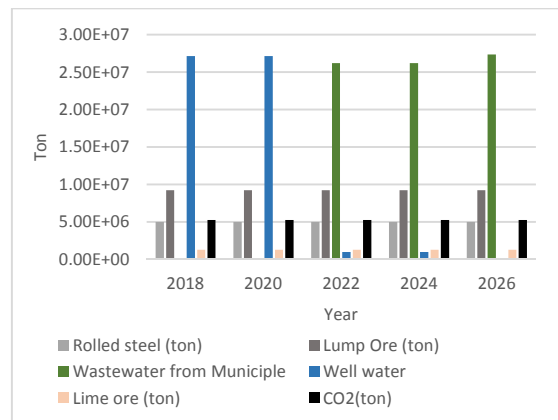


شکل (۱۳): رشد مصرف انرژی الکتریکی در اثر جایگزینی منابع آب با فاضلاب بازیابی شده، در اثر اجرای سناریو بهینه مدل WEMS-1

در سناریو بهینه در دوره آغازین با قیمت ارزان آب، بازیابی فاضلاب واحدها (Recycling) اقتصادی است. با بازیابی پساب واحدها، در مدل بهینه برای دوره‌های ابتدایی (سال ۲۰۱۸) تنها ۱۵٪ از کل مصرف آب کارخانه تأمین می‌شود. در ادامه رشد بیشتر قیمت منابع آب، خرید کامل ورودی از فاضلاب خارج از کارخانه را اقتصادی کرده است (شکل ۱۲). بر اساس مدل با گذر زمان و جایگزینی منابع، مقدار مصرف فاضلاب از لحاظ حجمی افزایش

ترکیب و بازیابی منابع انرژی واحدها استفاده می‌کنند) توجه داشته باشد. ارزیابی فناوری‌های جدید به روش ترمودینامیکی در واحدهای فولاد در تحقیقات بعدی می‌تواند انجام گیرد.

جایگزینی فناوری‌ها تغییر مقادیر آب و انرژی را در کارخانه فولاد به همراه دارد. تحلیل نتایج تغییر روند استفاده از منابع آب و انرژی، در اثر تحول فناوری در ادامه ارائه شده است. شکل (۱۰) برداشت از منابع آب و انرژی و خوراک ورودی واحدها و همچنین محصول تولیدی کارخانه فولاد را در سال‌های مختلف مدل‌سازی نشان می‌دهد. همان طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، سنگ آهن، آهک، آب تازه از جمله ورودی‌های اصلی به واحد فولاد بوده و ورق‌های فولادی از محصولات هستند. CO<sub>2</sub> نیز به صورت جانبی در مراحل مختلف تولید می‌شود. در این نمودار تمرکز بر اشاره به جایگزینی فاضلاب با منابع آب تازه با گذر زمان و رشد قیمت آب تازه است. به همین دلیل، همه جریان‌ها نشان داده نشده‌اند. از دوره ۲۰۲۲ فاضلاب جایگزین آب شده ولی هنوز اندکی آب تازه، برای واحدهایی که کیفیت بالای آب را نیاز داشته و فناوری‌های تصفیه پیشرفته را لازم دارند، مورد استفاده قرار گرفته است. اما در سال آخر با انتخاب فناوری‌های تصفیه پیشرفته فاضلاب همه نیاز واحد از فاضلاب ورودی تأمین شده است.

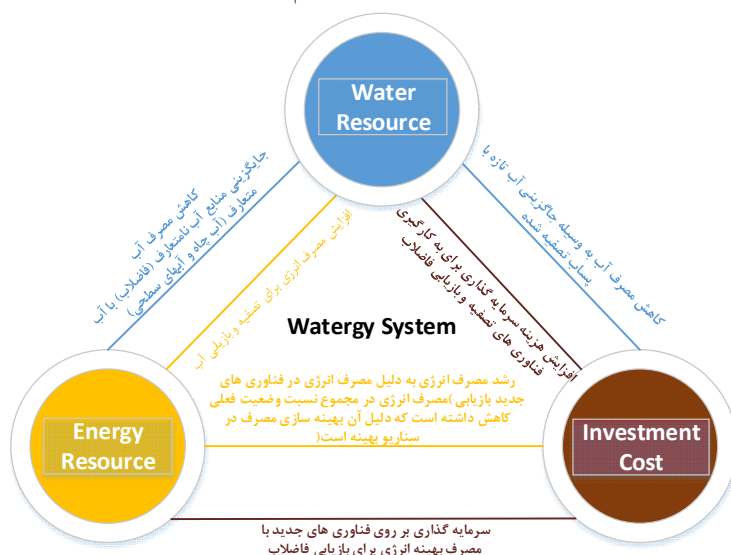


شکل (۱۰): مصارف جریان‌های مختلف ورودی و خروجی کارخانه فولاد در سناریو بهینه (به ازای تولید ۴/۹۷ میلیون تن فولاد در سال، با رشد قیمت آب و حامل‌های انرژی)

در اثر اجرای مدل در سناریو بهینه و به‌کارگیری فناوری‌هایی که بدون آب یا با مصرف کمتر آب کار می‌کنند، مصرف کلی آب سیستم تولید فولاد، نسبت به حالت فعلی کاهش یافته است (هرچند که استفاده از فاضلاب به دلیل بازدهی فناوری‌های تصفیه، مقدار حجم فاضلاب را کمی بیشتر از آب مورد نیاز می‌کند، در مجموع از نظر کمی هم منابع آب در سال پایه نسبت به مقدار فاضلاب در حالت بهینه بیشتر شده است). شاخص مصرف در این دو حالت در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

یک تن فولاد ارائه شده که با جایگزینی منابع فاضلاب و به‌کارگیری سیستم‌های تصفیه فاضلاب شاخص مصرف انرژی الکتریکی در مدل به ۹۹۴ kWh رسیده است. این در حالی است که به‌کارگیری فناوری جدید سیکلون خشک به‌جای اسکرابرهاي خنک‌کننده واحد احیا مصرف کمتر انرژی الکتریکی را به همراه دارد (اسکرابرهاي تر در واحد احیای مستقیم مصرف عمده آب این واحد را در بر داشته است).

می‌یابد. با تغییر نوع منبع آب و به‌کارگیری فناوری‌های تصفیه مصرف انرژی الکتریکی نیز همان‌طور که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، افزایش می‌یابد. این نمودار از دستاوردهای تحلیل سیستم واترژنی است که جایگزینی آب و انرژی را به‌خوبی نشان می‌دهد. مصرف برق در سناریو بهینه در سال پایه به‌دلیل انتخاب حالت عملیاتی بهینه و مطابق با استاندارد در مدل برابر ۹۸۷ kWh برای تولید



شکل (۱۴): ارتباط آب-انرژی و سرمایه‌گذاری روی فناوری‌های نوین، مثلث آب، انرژی و سرمایه‌توصیفی از ارتباط این سه پارامتر حاصل از نتایج اجرای سناریو بهینه در مدل WEMS-1 در تحقیق حاضر است (در مرجع [۲۲] نیز مثلث آب، انرژی و انتشار آلاینده‌ها، شکلی از ارتباط آب و انرژی را در راستای بیان مفاهیم مرتبط با همین نتایج بیان کرده است).

برای ارزیابی فناوری‌های مختلف و ارائه ترکیب بهینه و تخصیص بهینه منابع، مدل ریاضی WEMS-1 ارائه شده است. ابتدا وضعیت فعلی فولاد مبارکه در مدل اجرا و جهت اعتباربخشی، نتایج آن با مقادیر طرح جامع فولاد مقایسه شده است. نتایج مدل برای سال پایه با وضعیت فعلی فولاد مبارکه (BAU)، مصرف حدود ۶/۷۸ مترمکعب آب تازه و ۵۵۰ مترمکعب گاز و انتشار حدود ۱/۰۵ تن دی اکسید کربن را برای تولید یک تن فولاد نشان می‌دهد. در ادامه با رشد قیمت‌ها، اجرای سناریو بهینه با قرار دادن ضرایب استاندارد تبدیل و همچنین در نظر گرفتن فناوری‌های رقیب برای واحدها در مدل WEMS-1 اجرا شده است.

نتایج سناریو بهینه، جایگزینی فناوری‌های مختلف آب و انرژی را پیشنهاد داده است. در مدل بهینه با انتخاب نیروگاه با برج خنک‌کن هیبرید، به‌کارگیری سیستم خورشیدی برای تولید برق به‌جای توسعه سیکل بخار، سیستم تصفیه پیشرفته فاضلاب و به‌کارگیری سیستم جدید با سیکلون‌های جداسازی خشک [۶۲] در جایگزینی اسکرابرهاي تر واحد احیای مستقیم، در نهایت شاخص مصرف آب (متعارف و غیرمتعارف) از ۶/۷۸ به ۵/۴۶ مترمکعب در حالت بهینه کاهش یافته است.

تحول فناوری و جایگزینی اسکرابرهاي تر با فناوری جدید که از سیکلون‌های خشک برای جداسازی و پاکسازی جریان خروجی استفاده می‌کند، کاهش مصرف منابع آب و انرژی را با صرف سرمایه نتیجه می‌دهد. شکل (۱۴) مثلث ارتباط و جایگزینی جریان‌های آب و انرژی را در کنار سرمایه‌گذاری روی فناوری‌های نوین نشان می‌دهد. نتیجه مدل بهینه نشان می‌دهد که با صرف سرمایه در تعویض اسکرابرهاي واحد احیا با سیستم خشک خنک‌کننده، مصرف آب کاهش یافته است. همچنین با سرمایه‌گذاری روی تهیه فناوری‌های بخش تصفیه فاضلاب و با مصرف انرژی، مصرف آب جایگزین فاضلاب شده و از تخریب منابع جلوگیری شده است.

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

همان‌طور که در پیشینه پژوهش مربوط به آب و انرژی بررسی و تحلیل شد، مدل‌سازی یکپارچه آب و انرژی صنعت فولاد در کارهای پیشین با در نظر گرفتن منابع مختلف آب به‌صورت جامع انجام نگرفته است. در تحقیق حاضر در رویکردی جدید و یکپارچه، ابتدا مدل مفهومی و کیفی صنعت فولاد WERS، ترسیم شده است. در ادامه

جایگزینی برج‌های هیبرید خنک‌کننده در نیروگاه داخل کارخانه فولاد با برج‌های تر جهت کاهش مصرف آب به‌عنوان یکی از راهکارهای اصلی پیشنهاد می‌شود. در کارخانه فولاد در واحدهای مختلف برج‌های خنک‌کن تر در حال استفاده هستند. هرچند مدل برای برج‌های خنک‌کننده نیروگاه اجرا شده است، این موضوع با بررسی اولیه و امکان‌سنجی طرح برای برج‌های تر در سایر واحدهای کارخانه فولاد اثرگذاری بیشتری در کاهش مصرف منابع آب خواهد داشت.

تحول فناوری در بخش اسکرابر برج احیا و به‌کارگیری سیستم سیکلون‌های خنک‌کن خشک مانند مرجع [۶۲] (به‌عنوان بخشی که جزو واحدهای پر مصرف آب است) از بخش‌های تأثیرگذار در کاهش مصرف منابع برای سرمایه‌گذاری است. هرچند این فناوری برای عملیاتی شدن نیاز به نمونه پایلوت و تحقیق و توسعه تکمیلی دارد، با توجه به اثرگذاری آن در کاهش مصرف آب در چرخه تولید فولاد، در کاهش شاخص مصرف آب صنعت فولاد بسیار مؤثر است.

تولید آب از هوا با استفاده از فناوری‌های متداول تراکمی تولید آب از هوا که در بخش خانگی برای تأمین آب استفاده می‌شود، حتی در قیمت‌های بسیار بالای آب به دلیل هزینه سرمایه بالا در کنار مصرف بالای انرژی الکتریکی توجیه‌پذیر نیست. با توجه به حجم بالای بخار در واحدهای خنک‌سازی سرباره و نورد در صنعت فولاد، نیاز به ارائه طرحی اصلاح شده و جدید با استفاده از روش ترمودینامیکی و مناسب با شرایط واحد، برای تولید آب از بخارات این واحدها با هزینه سرمایه‌گذاری و مصرف انرژی کمتر است. رویکرد یکپارچه واترژنی (در سطح فناوری) برای طراحی سیستم تولید آب از هوا و بخارات، بازیابی آب به صورت اقتصادی را می‌تواند امکان‌پذیر کند و پیشنهاد می‌شود.

با رشد قیمت آب، باز چرخه و تصفیه فاضلاب در کارخانه فولاد اهمیت پیدا کرده و اقتصادی می‌شود. با توجه به بحران آب به‌ویژه مناطق گرم و خشک ایران، ارزش آب روزبه‌روز بیشتر شده و عملاً به قیمتی بیشتر از قیمت‌های ارائه‌شده در مدل می‌رسد. سیستم‌های تصفیه اولیه و ثانویه در حال حاضر نیز در کشور تقریباً اقتصادی شده‌اند. با توجه به شرایطی که برای رشد قیمت آب پیش‌بینی می‌شود، به‌کارگیری و بهره‌برداری سیستم‌های تصفیه پیشرفته (مانند انواع سیستم‌های غشایی) برای واحدهایی که به آب با کیفیت بالاتر نیاز دارند مانند واحد گندله‌سازی پیشنهاد می‌شود.

- سیستم تصفیه فاضلاب ثانویه با امکان استفاده از فاضلاب به‌عنوان ورودی کارخانه فولاد انتخاب شده و با رشد ارزش آب در سال پایانی سیستم تصفیه پیشرفته غشایی، برای تأمین آب گندله‌سازی اقتصادی شده و به کار گرفته شده است. بهینه‌سازی سیستم‌ها و به‌کارگیری فناوری‌های جدید جایگزین در سیستم فولاد هرچند مصرف انرژی الکتریکی را کاهش می‌دهد، تأمین انرژی فناوری‌های تصفیه برای جایگزینی منابع آب متعارف با فاضلاب افزایش مصرف انرژی را همراه دارد. برای تولید حدود ۴,۹۷۰,۰۰۰ تن فولاد در سال، رشد مصرف الکتریسیته در فولاد مبارکه، حدود ۳۳ میلیون کیلووات ساعت در سال شده است که دلیل اصلی این امر جایگزینی منابع فاضلاب با آب و به‌کارگیری فناوری‌های مصرف‌کننده انرژی در تصفیه تکمیلی است. این موضوع از نتایج مهم تحلیل یکپارچه آب و انرژی در سیستم واترژنی است که جایگزینی آب و انرژی با یکدیگر با استفاده از سرمایه‌گذاری و تحول فناوری را نشان می‌دهد.
- و در انتها با استفاده از تحلیل سیستم واترژنی صنعت فولاد و نتایج مدل WEMS-1، پیشنهادهای سیاست‌گذاری برای استفاده در سیستم آب و انرژی صنعت فولاد مبارکه اصفهان و همچنین به‌عنوان الگویی برای سایر واحدهای تولیدی، یا در حال توسعه فولاد در کشور برای کاهش تخریب منابع آب و انرژی به صورت زیر ارائه می‌شود:
- بهینه‌سازی واحدها با استفاده از ممیزی آب و انرژی، و نزدیک کردن مصرف به مقادیر استاندارد، درصدی از کاهش مصرف منابع آب و منابع انرژی را با صرف سرمایه‌گذاری کم می‌تواند به همراه داشته باشد.
- استفاده و خرید منابع آب غیرمتعارف (فاضلاب‌های شهری و صنعتی) در کارخانه‌های فولاد، به‌عنوان جایگزین مناسب برای آب تازه برای مقابله با محدودیت دسترسی به منابع آب است. با توجه به حجم بالای مصرف کارخانه فولاد، جایگزینی فاضلاب با منابع آب تازه تأثیر بسزایی در حفظ منابع آب دارد. به همین دلیل جزء مؤثرترین راهکارهای مقابله با چالش‌های مرتبط با کمبود آب است (این راهکار در حال حاضر در این صنایع در حال پیگیری و اجرایی شدن است که مدل WEMS-1 هم تأیید این انتخاب را می‌رساند).
- جایگزینی فاضلاب با آب تازه به دلیل به‌کارگیری فناوری‌های تصفیه، رشد مصرف انرژی را به همراه دارد. با توجه به رشد قیمت انرژی الکتریکی در بلندمدت، به‌کارگیری فناوری‌های تجدیدپذیر مانند فتوولتائیک راهکاری مناسب در بلندمدت برای تأمین انرژی بدون افزایش مصرف آب جهت تأمین برق مورد نیاز است.

فهرست علائم

$S_{vrgt}$	جریان آب خروجی $g$ از منبع $v$ به فناوری $t$ در زمان $t$
$P_{ijt}$	انتشار آلاینده $i$ در حجم کنترل $j$ در نقطه زمانی $t$
$p_{ijt}$	ضریب نشر آلاینده $i$ در حجم کنترل $j$ در زمان $t$
$X_{jt}$	متغیر حالت حجم کنترل $j$ (سطح فعالیت فناوری $j$ ) در نقطه زمانی $t$
$WW_{ijt}$	فاضلاب تولیدی $i$ در فناوری $j$ در زمان $t$
$ww_{ijt}$	ضریب تولید فاضلاب $i$ در فناوری $j$ در زمان $t$
$Y_{jt}$	موقعیت متغیر فناوری $j$ (سطح فعالیت فناوری $j$ ) در زمان $t$
$\bar{K}$	ارزش فعلی هزینه سرمایه کل
$\bar{M}$	ارزش فعلی هزینه نگهداری کل سیستم
$\bar{C}$	ارزش فعلی هزینه عملیاتی کل سیستم
$\bar{R}$	ارزش فعلی کل منابع ورودی به سیستم
$\bar{E}$	ارزش فعلی هزینه‌های کل اثرات خارجی سیستم عرضه آب و انرژی مرتبط با جریان و هزینه‌های خارجی آلاینده‌ها
$\bar{w}$	هزینه منابع مختلف آب ورودی به سیستم (متعارف و غیرمتعارف)
$\bar{e}$	هزینه جریان‌های انرژی مختلف ورودی به سیستم
$\bar{f}$	هزینه جریان‌های سایر مواد ورودی به سیستم

پیوست ۱: هزینه سرمایه‌گذاری فناوری‌های صنعت فولاد

هزینه‌های سرمایه‌گذاری فناوری‌های اصلی آب و انرژی در صنعت فولاد در جدول زیر ارائه شده است.

جدول (۳): هزینه سرمایه‌گذاری فناوری‌های مختلف در صنعت فولاد [۸ و ۶۳]

Technology	Capital Cost	Conventional unit
Concentrate	55.5	\$(/ton/yr)
Pelletization	50.875	\$(/ton/yr)
Midrex (Wet Scrubber)	111	\$(/ton/yr)
Midrex (Dry Cyclon)	120.5	\$(/ton/yr)
Midrex (with water generation system)	150	\$(/ton/yr)
Arc furnace	185	\$(/ton/yr)
Rolled steel	50	\$(/ton/yr)
Steam Powerplant by wet cooling tower	800	\$/KW
Steam Powerplant by Hybrid Cooling tower	850	\$/KW
Gas Turbin	500	\$/KW
PV	1080	\$/KW
Primary Wastewater treatment	17.36	\$(/m <sup>3</sup> /day)
Secondry Treatment	115.7	\$(/m <sup>3</sup> /day)
Advanced Treatment	462.9	\$(/m <sup>3</sup> /day)

علائم	تعریف
$Z$	ارزش فعلی هزینه کل سیستم
$P_{ijt}$	قیمت عامل تولید $i$ در زمان $t$
$F_{ijt}$	مصرف عامل تولید $i$ در زمان $t$
$r$	نرخ تنزیل
$\delta_t$	ضریب وزنی هزینه
$t$	زمان
$f$	تابع تولید
$Q_t$	تقاضا برای محصول در زمان $t$
$R_{j;0}$	میزان موجودی اولیه عامل تولید (منابع) $j$
$F_{j;t}$	مصرف عامل تولید $j$ در زمان $t$
$F_{k;t}$	مصرف عامل تولید $k$ در زمان $t$
$D_{j;t}$	افزایش در موجودی عامل تولید $j$ در زمان $t$
$A_{k;t}$	محدودیت بر مصرف عامل تولید $k$ در زمان $t$
$F_{k;t}$	جریان مصرف آب یا انرژی در فناوری $t$ برای تولید انرژی مفید (جریان آب) یا محصول تولیدی $j$ از طریق تبدیل انرژی مفید (جریان آب) $k$ در زمان $t$
$\eta_{k;t}$	بازده دستگاه نهایی که انرژی (جریان آب یا ماده) $k$ را به انرژی مفید (جریان آب خروجی) یا محصول خروجی $j$ در زمان $t$ تبدیل می‌کند.
$U_{jt}$	محصول تولیدی یا خروجی مفید $j$ در زمان $t$
$\alpha_j$	سهم در تقاضای محصول تولیدی یا انرژی مفید (جریان آب) $j$
$Y_{k;t}$	ظرفیت تازه ساخته شده (افزایش ظرفیت) فناوری نوع $t$ برای تبدیل حامل انرژی (جریان آب و سایر مواد ورودی) $k$ به انرژی مفید (جریان آب یا محصول تولیدی) $j$ در زمان $w$ که $w$ یک نقطه بین $t$ تا $t+1$ است.
$PF_{k;t}$	ضریب ظرفیت فناوری $t$ برای تبدیل حامل انرژی (جریان آب یا ماده) $k$ به انرژی مفید (جریان آب یا ماده) $j$ در زمان $t$
$H_{k;t}$	ظرفیت تاریخی فناوری $t$ برای تبدیل حامل انرژی (جریان آب یا ماده) $k$ به انرژی مفید (جریان آب خروجی یا ماده خروجی) $j$ در زمان $\theta$ که $\theta$ نقطه‌ای بین $(b-\theta)$ و $b$ سال مرجع (سال پایه) می‌باشد و $PL$ نیز طول عمر فناوری است.
$P_{fot}$	جریان انرژی یا آب خروجی یا ماده $o$ از فناوری $f$ به فناوری $t$ در زمان $t$
$\eta_{ot}$	بازدهی فناوری $t$ در زمان $t$
$A_{o;et}$	ورودی انرژی یا جریان آب یا ماده $o$ به فناوری $f$ در زمان $t$ برای تولید انرژی یا جریان آب یا ماده $e$
$W_{intt}$	مقدار آب فاضلاب تولیدی $r$ از فناوری $t$ در مسیر تبدیل جریان $l$ به $n$ که قابلیت بازیابی در زمان $t$ را دارد.
$\beta_{r;intt}$	ضریب بازیابی فاضلاب تولیدی $r$ در مسیر تبدیل جریان $l$ به جریان $n$ در فناوری $t$ و در زمان $t$
$M_{intt}$	جریان ورودی $l$ به فناوری $t$ در زمان $t$ برای تبدیل به جریان $n$
$F_{n;t}$	جریان تولیدی $n$ از جریان $l$ در فناوری $t$ در زمان $t$
$E_{fot}$	جریان انرژی $o$ از منبع $f$ در زمان $t$
$P_{fot}$	انرژی ورودی $o$ از منبع $f$ به فناوری $t$ در زمان $t$
$W_{vgt}$	جریان آب $g$ از منبع $v$ در زمان $t$

مراجع

[1] Skaggs, R., Hibbard, K. A., Frumhoff, P., Lowry, T., Middleton, R., Pate, R., Tidwell, R., Arnold, V., Averly, J., Janetos, k., "Climate and Energy-Water-Land System Interactions Technical Report to the US Department of Energy in Support of the National Climate Assessment", Pacific Northwest National Lab., Richland, WA (United States), No. PNNL-21185, 2012.

[2] Dubreuil, A., Assoumou, E., Bouckaert, S., Selosse, S., and Mai, N., "Water Modeling in an Energy Optimization Framework-The Water-Scarce Middle east Context",



- Applied energy, Vol. 101: pp. 268-279, 2013.
- [3] Gleick, P.H., "Water in Crisis: Paths to Sustainable Water Use", Ecological Applications, Vol. 8, No 3, pp. 571-579, 1998.
- [4] Grey, D. and Sadoff, C.W., "Sink or Swim? Water Security for Growth and Development", Water Policy, Vol. 9, No. 6, pp. 545-571, 2007.
- [5] -, "Steel Statistical Yearbook 2017", 2017.
- [۶] -، «ترازنامه هیدروکربوری کشور»، مؤسسه مطالعات بین‌المللی انرژی، گروه ترازنامه هیدروکربوری موسسه مطالعات بین‌المللی انرژی، ۱۳۹۵.
- [7] Price, L., Sinton, J., Worrell, E., Philipsen, D., Xiulian, H., & Ji, L., "Energy Use and Carbon Dioxide Emissions from Steel Production in China", Energy, Vol. 27, No. 5, pp. 429-446, 2002.
- [۸] -، «مطالعات طرح جامع فولاد کشور»، شرکت مهندسی بین‌المللی فولادتکنیک، سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (IMIDRO)، ۱۳۹۵.
- [9] Faramarzi, M., Yang, H., Mousavi, J., Schulin, R., Binder, C., & Abbaspour, K. C., "Analysis of Intra-Country Virtual Water Trade Strategy to Alleviate Water Scarcity in Iran", Hydrology and Earth System Sciences, Vol. 14, No. 8, pp. 1417, 2010.
- [10] Vörösmarty, C.J., McIntyre, P.B., Gessner, M.O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S.E., Sullivan, C.A., Liermann, C.R. and Davies, P.M., "Global Threats to Human Water Security and River Biodiversity", Nature, Vol 467, No. 7315, pp. 555-561, 2010.
- [11] -----, "Water Security Framework", WaterAid, 2012.
- [12] Bizikova, L., Roy, D., Swanson, D., Venema, H. D., & McCandless, M., "The Water-Energy-Food Security Nexus: Towards a Practical Planning and Decision-Support Framework for Landscape Investment and Risk Management", International Institute for Sustainable Development Winnipeg, Manitoba, 2013.
- [13] Khatib, H., IEA, "World Energy Outlook 2016—A Comment", Energy policy, 2016.
- [14] Faramarzi, M., Abbaspour, K. C., Schulin, R., & Yang, H. "Modelling Blue and Green Water Resources Availability in Iran", Hydrological Processes, Vol. 23, No. 3, pp. 486-501, 2009.
- [15] Shayannejad, M., Eslamian, S., Singh, V., & Ostad-Ali-Askari, K., "Evaluation of Groundwater Quality for Industrial Using GIS in Mountainous Region of Isfahan Province, Koh-Payeh, Isfahan, Iran", International Journal of Constructive Research in Civil Engineering (IJCRCE), Vol. 3, No. 3, pp. 24-37, 2017.
- [16] Solow, R.M., "Technical Change and the Aggregate Production Function", The Review of Economics and Statistics, pp. 312-320, 1957.
- [17] -----, "Identification of Water and Energy Conservation in the Iron & Steel Industry in China", Danish Ministry of the Environment, Environmental Protection Agency, 2014.
- [18] Kong, H., Qi, E., Li, H., Li, G., & Zhang, X., "An MILP Model for Optimization of By Product Gases in the Integrated Iron and Steel Plant", Applied Energy, Vol. 87, No. 7, pp. 2156-2163, 2010.
- [19] -----, "Strategic Plan of Iran's Ministry of Industry, Mine and Trade", Deputy of Designing and Planning, 2015.
- [20] Water, E., "Energy: Leveraging Voluntary Programs to Save Both Water and Energy", Environmental Protection Agency, 2008.
- [21] Chen, W., X. Yin, and D. Ma, "A Bottom-up Analysis of China's Iron and Steel Industrial Energy Consumption and CO2 Emissions", Applied Energy, Vol. 136, pp. 1174-1183, 2014.
- [22] Wang, C., Wang, R., Hertwich, E., & Liu, Y., "A Technology-Based Analysis of the Water-Energy-Emission Nexus of China's steel Industry", Resources, Conservation and Recycling, Vol. 124, pp. 116-128, 2017.
- [23] Lofman, D., M. Petersen, and A. Bower, "Water, Energy and Environment Nexus: The California Experience", International Journal of Water Resources Development, Vol. 18, No. 1, pp. 73-85, 2002.
- [24] Hussey, K. and J. Pittock, "The Energy-Water Nexus: Managing the Links Between Energy and Water for a Sustainable Future", Ecology and Society, Vol. 17, No. 1, 2012.
- [25] Stillwell, A., King, C., Webber, M., Duncan, I., & Hardberger, A., "The Energy-Water Nexus in Texas, Part of a Special Feature on The Energy-Water Nexus. Managing the Links Between Energy and Water for a Sustainable Future", Ecology and Society, Vol. 16, No. 1, 2011.
- [26] Dai, Jiangyu, Shiqiang Wu, Guoyi Han, Josh Weinberg, Xinghua Xie, Xiufeng Wu, Xingqiang Song, Benyou Jia, Wanyun Xue, and Qianqian Yang., "Water-Energy Nexus: A Review of Methods and Tools for Macro-Assessment", Applied Energy, Vol. 210, pp. 393-408, 2018.
- [27] Cutter, E., Haley, B., Williams, J., & Woo, C., "Cost-Effective Water-Energy Nexus: a California Case Study", The Electricity Journal, Vol. 27, No. 6, pp. 61-68, 2014.
- [28] Wang, J., Li, S., Xiong, G., & Cang, D., "Application of Digital Technologies About Water Network in Steel Industry", Resources, Conservation and Recycling, Vol. 55, No. 8, pp. 755-759, 2011.
- [29] Wang, J., Rothausen, S. G., Conway, D., Zhang, L., Xiong, W., Holman, I. P., & Li, Y. "China's Water-Energy Nexus: Greenhouse-Gas Emissions from Groundwater Use for Agriculture", Environmental Research Letters, Vol. 7, No. 1, pp. 014035, 2012.
- [30] Wakeel, M., Chen, B., Hayat, T., Alsaedi, A., & Ahmad, B., "Energy Consumption for Water Use Cycles in Different Countries: a Review", Applied Energy, Vol. 178, pp. 868-885, 2016.
- [31] Walker, R. V., Beck, M. B., Hall, J. W., Dawson, R. J., & Heidrich, O., "The Energy-Water-Food Nexus: Strategic Analysis of Technologies for Transforming the Urban Metabolism", Journal of Environmental Management, Vol. 141, pp. 104-115, 2014.
- [32] Annex, V., "Seeking Sustainable Climate Land Energy and Water (CLEW) Strategies". Nuclear Technology Review, 2009.
- [33] Bazilian, M., Rogner, H., Howells, M., Hermann, S., Arent, D., Gielen, D., Steduto, P., Mueller, A., Komor, P., Tol, R.S. and Yumkella, K.K., "Considering the Energy, Water and Food Nexus: Towards an Integrated Modelling Approach", Energy Policy, Vol. 39, No. 12, pp. 7896-7906, 2011.
- [34] Fricko, O., Parkinson, S. C., Johnson, N., Strubegger, M., van Vliet, M. T., & Riahi, K., "Energy Sector Water Use Implications of a 2 C Climate Policy", Environmental Research Letters, Vol. 11, No. 3, p. 034011, 2016.
- [35] Bouckaert, S., Selosse, S., Dubreuil, A., Assoumou, E., & Maïzi, N., "Analyzing Water Supply in Future Energy Systems Using The TIMES Integrated Assessment Model (TIAM-FR)", in 3rd International Symposium on Energy Engineering, Economics and Policy: EEEP 2011.
- [36] Sokolov, A.P., Schlosser, C.A., Dutkiewicz, S., Paltsev, S., Kicklighter, D.W., Jacoby, H.D., Prinn, R.G., Forest, C.E., Reilly, J.M., Wang, C. and Felzer, B.S., "MIT Integrated Global System Model (IGSM) Version 2: Model Description

- and Baseline Evaluation", MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, 2005.
- [37] Strzepek, K., Schlosser, C.A., Gueneau, A., Gao, X., Blanc, É., Fant, C., Rasheed, B. and Jacoby, H.D., "Modeling Water Resource Systems Under Climate Change: IGSM-WRS", MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, 2012.
- [38] van Straten, G., Stigter, J., Janssen, H., Gieling, T. H., Speetjens, S., & van der Walle, T., "Watergy, Towards a Closed Greenhouse in Semi-Arid Regions-Experiment with a Heat Exchanger", in International Conference on Sustainable Greenhouse Systems-Greensys 2004 691, pp. 845-852, 2004.
- [39] Jochum, P., Zaragoza, G., Pérez-Parra, J., Buchholz, M., & Buchholz, R., "Temperature and Humidity Control in the Watergy Greenhouse", in International Symposium on Greenhouse Cooling 719, pp. 401-408, 2006.
- [40] Zaragoza, G., Buchholz, M., Jochum, P., & Pérez-Parra, J., "Watergy Project: Towards a Rational Use of Water in Greenhouse Agriculture and Sustainable Architecture", Desalination, Vol. 211, No. 1-3, pp. 296-303, 2007.
- [41] Speetjens, S.L., "Towards Model Based Adaptive Control for the Watergy Greenhouse: Design and Implementation", 2008.
- [42] deMonsabert, S. and B.L. Liner, "Integrated Energy and Water Conservation Modeling. Journal of Energy Engineering", Vol. 124, No. 1, pp. 1-19, 1998.
- [43] do Save Energy, A., "WATERGY: Energy and Water Efficiency in Municipal Water Supply and Wastewater Treatment: Cost-effective Savings of Water and Energy", Washington: Alliance, 2007.
- [44] James, K., S.L. Campbell, and C.E. Godlobe, "Watergy: Taking Advantage of Untapped Energy and Water Efficiency Opportunities in Municipal Water Systems", in *Watergy: Taking Advantage of Untapped Energy and Water Efficiency Opportunities in Municipal Water Systems*, Alliance to Save Energy, 2002.
- [45] Janssen, H., Gieling, T. H., Speetjens, S., Stigter, J., & van Straten, G., "Watergy: Infrastructure for Process Control in a Closed Greenhouse in Semi-Arid Regions", in International Conference on Sustainable Greenhouse Systems-Greensys 2004 691, 2004.
- [46] Barry, J.A., "Watergy: Energy and Water Efficiency in Municipal Water Supply and Wastewater Treatment. Cost-Effective Savings of Water and Energy", Alliance to Save Energy, Washington, DC, 2007.
- [47] Johnson, T., P.P. da Silva Filho, and A.S. Meyer, "Energy Efficiency in the Water Supply and Sanitation Sector in Brazil", World Bank/ESMAP Report. World Bank, Washington, DC, 2008.
- [48] Fathi, A., Saboohi, Y., Škrjanc, I., & Logar, V., "Comprehensive Electric Arc Furnace Model for Simulation Purposes and Model-Based Control", Steel Research International, Vol. 88, No. 3, 2017.
- [49] -----, "Water and Energy Nexus: A Literature Review", A Joint Program of Stanford Woods Institute for the Environment and Bill Lane Center for the American West, August, Water in the West, Stanford University, 2013.
- [50] Gerbens-Leenes, P., A. Hoekstra, and R. Bosman, "The Blue and Grey Water Footprint of Construction Materials: Steel, Cement and Glass", Water Resources and Industry, Vol. 19, pp. 1-12, 2018.
- [51] Antón, A., F. Castells, and J. Montero, "Land Use Indicators in Life Cycle Assessment", Case Study: The Environmental Impact of Mediterranean Greenhouses. Journal of Cleaner Production, Vol. 15, No. 5, pp. 432-438, 2007.
- [52] Racoviceanu, A. I., Karney, B. W., Kennedy, C. A., & Colombo, A. F., "Life-Cycle Energy Use and Greenhouse Gas Emissions Inventory for Water Treatment Systems", Journal of Infrastructure Systems, Vol. 13, No. 4, pp. 261-270, 2007.
- [53] Tom, M.S., P.S. Fischbeck, and C.T. Hendrickson, "Energy Use, Blue Water Footprint, and Greenhouse Gas Emissions for Current Food Consumption Patterns and Dietary Recommendations in the US", Environment Systems and Decisions, Vol. 36, No. 1, pp. 92-103, 2016.
- [54] Tong, Y., et al., "Water Consumption and Wastewater Discharge in China's Steel Industry", Ironmaking & Steelmaking, Vol. 45, No. 10, pp. 868-877, 2018.
- [55] Loulou, R. and M. Labriet, "ETSAP-TIAM: the TIMES Integrated Assessment Model Part I: Model structure", Computational Management Science, Vol. 5, No. 1-2, pp. 7-40, 2008.
- [56] Gabriel, S.A., A.S. Kydes, and P. Whitman, "The National Energy Modeling System: a Large-Scale Energy-Economic Equilibrium Model", Operations Research, Vol. 49, No. 1, pp. 14-25, 2001.
- [57] S Mirkhani, Y.S., "Stochastic Modeling of the Energy Supply System with Uncertain Fuel Price-A Case of Emerging Technologies for Distributed Power Generation", Applied energy, Vol. 93, pp. 668-674, 2012.
- [58] Saboohi, Y., "Energy Supply Model: Esm 84", Technical Report, Sharif Energy Research Institute, (Seri), 2005.
- [59] Safarian, S., Y. Saboohi, and M. Kateb, "Evaluation of Energy Recovery and Potential of Hydrogen Production in Iranian Natural Gas Transmission Network", Energy policy, Vol. 61, pp. 65-77, 2013.
- [60] Sahabmanesh, A. and Y. Saboohi, "Model of Sustainable Development of Energy System, Case of Hamedan. Energy Policy", Vol. 104, pp. 66-79, 2017.
- [61] Conrad, K., "A Theory of Production with Waste and Recycling", Discussion papers/Institut für Volkswirtschaftslehre und Statistik; Department of Economics, Universität Mannheim, Vol. 550, 1997.
- [62] Saboohi, Y., "Use of Cyclonic Heat Exchanger in the Production of Sponge Iron", UK Patent Application, No. 0717649.8, 2007.
- [63] IEA., "Energy Technology Transitions for Industry: Strategies for the Next Industrial Revolution", OECD Publishing, 2009.